



UNIVERSIDADE DO MINDELO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR

CURSO DE LICENCIATURA em ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANO LETIVO 2018/2019 – 4º ANO

**Tema: Desenvolvimento e Construção de um Concentrador Solar
Cilindro Parabólico para Aquecimento de Água**

Autor: Mírcia Bárbara Miranda Fortes Monteiro, Nº 3920

Orientador: Doutor. José Pedro de Barros Fonseca

Mindelo, 2019

UNIVERSIDADE DO MINDELO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA EM ENERGIAS
RENOVÁVEIS

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANO LETIVO 2018/2019 –4º ANO

**Tema: Desenvolvimento e Construção de um Concentrador Solar Cilindro
Parabólico para Aquecimento de água**

Autor: Mírcia Bárbara Miranda Fortes Monteiro

Orientador: Doutor. José Pedro de Barros Fonseca

Mindelo, 2019

Mírcia Bárbara Miranda Fortes Monteiro

**Desenvolvimento e Construção de um Concentrador Solar Cilindro
Parabólico para Aquecimento de água**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Universidade do Mindelo
como parte dos requisitos para obtenção
do grau de licenciatura em Engenharia
em Energias Renováveis.

Mindelo, 2019

“Saiba que seu destino é traçado pelos seus próprios pensamentos, por isso você deve tomar o seu pensamento mais elevado, mais belo e mais próspero.”

Martin Luther King

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente aos meus queridos pais, Maria do Rosário Miranda Fortes e José Jaime Cruz Monteiro. Dedico também a todos que de uma forma ou de outra me apoiaram e motivaram durante todos esses anos de formação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu energia, força e coragem para enfrentar os obstáculos ao longo desses anos.

Agradeço aos meus pais Maria do Rosário Miranda e José Jaime Monteiro, por nunca desistirem de mim, incentivando sempre o meu progresso, visto que sem eles nada disso seria possível.

Agradeço também ao meu orientador, Doutor. José Pedro de Barros Fonseca, na qualidade de meu orientador, pela disponibilidade, apoio e sugestões na realização deste trabalho de conclusão de curso.

A todos os meus colegas de sala, que juntos enfrentamos esses 4 anos de muita luta, especialmente ao meu colega Júlio Medina que não mediu esforços em ajudar-me sempre que fosse necessário.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa jornada decisiva em minha vida.

RESUMO

A energia solar é uma fonte de energia, que desde os primórdios da civilização humana, suscitou grande interesse levando ao desenvolvimento de diversas tecnologias que permitissem o seu aproveitamento. Devido aos problemas energéticos que a sociedade tem enfrentado, a necessidade de desenvolver tecnologias que permitissem o aumento da eficiência dos sistemas solares tornou-se preponderante. Uma boa opção é o uso de radiação solar como fonte de energia térmica e geração de energia mecânica ou elétrica através de concentradores solares. O concentrador solar cilindro parabólico é constituído de uma superfície refletora que direciona a radiação solar incidente para a linha focal, onde se encontra um tubo absorvedor contendo o fluido que será aquecido.

O objetivo desse projeto é construir um concentrador solar cilindro parabólico para a produção de água á altas temperaturas. O concentrador contém um tubo absorvedor de cobre. No concentrador é aplicado uma película refletiva de alumínio polido. O protótipo apresenta eficiência ótica máxima de 77% atingido ao 12:00. O sistema apresenta um seguidor solar de um eixo, com movimentação horizontal, para mover o concentrador na posição este-oeste. Este é controlado com o Arduíno por meio da leitura dos sensores LDR, permitindo assim acionar o servo motor.

O concentrador possui um sistema de controlo equipado por sensor DHT11 para leitura da temperatura e humidade ambiente, dois sensores de temperatura DS18B20 para medir a temperatura na entrada e na saída do concentrador, sendo que o reservatório é controlado com o Arduíno por meio de sensores de nível e na saída contém um medidor de caudal. Os dados são visualizados no computador pela comunicação serial.

Palavras-chave: Concentrador Cilindro Parabólico, Seguidor Solar, Arduíno

ABSTRACT

Solar energy is a source of energy, which since the beginning of human civilization, has aroused great interest leading to the development of various technologies that would allow its use. Due to the energy problems that society has been facing, the need to develop technologies that would allow the increase in efficiency of solar systems has become predominant. A good option is the use of solar radiation as a source of thermal energy and generation of mechanical or electrical energy through solar concentrators. The cylindrical-parabolic solar concentrator is made up of a cylindrical parabolic reflecting surface that directs the incident solar radiation to the focal line, where there is an absorber tube containing the fluid that will be heated.

The objective of this project is to build a parabolic cylindrical solar concentrator for the production of high temperature water. The concentrator contains a copper absorber tube. A polished aluminium reflective film is applied to the concentrator. The prototype has a maximum optical efficiency of 77% at 12:00. The system features a one axis solar tracker, with horizontal movement, to move the concentrator in the east-west position. This is controlled with the Arduino through the reading of the LDR sensors, thus allowing to drive the servomotor.

The concentrator has a control system equipped with a DHT11 sensor for reading the ambient temperature and humidity, two DS18B20 temperature sensors to measure the temperature at the inlet and outlet of the concentrator, and the reservoir is controlled with Arduino by means of level sensors and the outlet contains a flow meter. The data is displayed on the computer via serial communication.

Keywords: Parabolic Cylinder Concentrator, Solar Tracker, Arduino

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Situação Energética de Cabo Verde	16
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Objetivo Geral	19
1.4 Objetivos Específicos	19
1.5 Metodologia.....	19
2.1 Recurso Solar.....	20
2.1.1 O Sol.....	20
2.1.2 Radiação Solar Extraterrestre	20
2.1.3 Radiação Solar Terrestre	22
2.1.4 Ângulos Solares.....	22
2.2 Radiação Solar em Cabo Verde.....	24
2.3 Energia Solar	25
2.3.1 Energia Solar Passiva	25
2.3.2 Energia Solar Ativa	26
2.3.3 Energia Solar Fotovoltaica	26
2.4 Sistemas de Aquecimento de Água	26
2.4.1 Coletores Planos	27
2.4.2 Coletores de Tubos de Vácuo.....	28
2.4.3 Coletor Parabólico Composto (CPC)	28
2.5 Sistemas de Concentração da Radiação Solar	29
2.5.1 Central de Torre.....	29
2.5.2 Disco Parabólico.....	30
2.5.3 Concentrador Cilindro Parabólico	31
2.5.4 Concentrador com Refletor Fresnel.....	32
2.6 Concentrador Solar Cilindro Parabólico.....	33
2.6.1 Principais Componentes	33
2.6.2 Elemento Absorvedor	34

2.6.3 Refletores Cilindro Parabólico	35
2.6.4 Sistema de Rastreamento.....	37
2.6.5 Estrutura de Suporte	37
2.6.7 Rendimento Ótico.....	40
2.6.8 Análise Térmica.....	41
2.7 Sistema de Controlo	43
2.7.1 Arduíno.....	43
2.7.2 Sensor	46
CAPÍTULO III: DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	52
3.1 Descrição do Sistema.....	52
3.2 Concentrador	53
3.3 Análise Ótica do Protótipo	54
3.5 Tubo Absorvedor.....	56
3.6 Balanço Energético do Protótipo.....	56
3.7 Seguidor Solar	59
3.7.1 Programação no Arduíno.....	60
3.7.2 Código	61
3.7.3 Circuito do Seguidor Solar	63
3.8 Controlo do Sistema	63
3.9 Custo do Protótipo.....	65
4- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
5. CONCLUSÃO.....	67
6. RECOMENDAÇÕES.....	68
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
8. ANEXOS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variação da radiação extraterrestre ao longo do ano	21
Figura 2: Ângulos solares	23
Figura 3: Coletor Plano	27
Figura4: Coletores de Tubos de Vácuo	28
Figura 5: Coletor Parabólico Composto (CPC).....	29
Figura 6: Central de Torre	30
Figura 7: Concentrador de Disco Parabólico.....	31
Figura 8: Concentrador Cilindro Parabólico	32
Figura 9: Concentradores de Fresnel	33
Figura 10: Análise ótica de um concentrador cilindro parabólico.....	38
Figura 11: Arduíno Uno R3.....	44
Figura 12: IDE Arduíno.....	45
Figura 13: Pinos sensor DHT11	47
Figura 14: Funcionamento do Sensor de Fluxo de Água	47
Figura 15: Sensor de Temperatura DS18B20.....	49
Figura 16: Detalhes das conexões elétricas do sensor DS18B20 e seus terminais.....	49
Figura: 17 Sensor LDR.....	50
Figura 18: Descrição do Sistema.....	52
Figura 19: Dimensões do Concentrador	53
Figura 20: Estrutura do Concentrador	54
Figura 21: Parâmetros da análise ótica do sistema	56
Figura 22: Diagrama bloco do seguidor solar	60
Figura 23 Algoritmo controlo do seguidor solar	61
Figura 24: Circuito do seguidor solar	63
Figura 25: Diagrama de controlo.....	64
Figura 26: Circuito ligação do DS18B20 no Arduíno.....	72
Figura 27: Circuito ligação do DHT11 no Arduíno	73
Figura 28: Circuito ligação do Yf-S201C no Arduíno	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Evolução da Potência disponível (kW) nos ano de 2017-2018	18
Tabela 2: Dados Climáticos do Mindelo	24
Tabela 3: Coeficientes C e n para cilindros horizontais	42
Tabela 4: Calor solar no concentrador no dia 1 de setembro 2019	57
Tabela 5: Rendimento ótico do sistema.....	58
Tabela 6: Propriedades Físicas da Água.....	58
Tabela 7: Custo do protótipo	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Matriz energética mundial em 2016.....	25
---	----

SIGLAS E ABREVIATURAS

A-Ampère

AQS-Sistema de água quente solar

A_a-Área de abertura

A_r-Área do absorvedor

A_f-Fator geométrico

CO₂- Dióxido de carbono

C_p -Capacidade calorífica

CPC-Coletor parabólico composto

°C-Graus Celsius

CLRF-Concentrador linear com refletor fresnel

CCP-Concentrador cilindro parabólico

Cm-Centímetro

D - Diâmetro

f -Distância focal

f_o . Fator de eficiência

GEE-Gases de efeito estufa

G_{sc} .Constante solar

G_{on}-Radiação extraterrestre

G_{nd}-Terra

h_p .Altura da parábola

H₂O-Água

IDE- Integrated Development Enviroment

K-Condutividade térmica

KWh-Quilowatt-hora

°K-Graus Kelvin

L-Comprimento

LDR-Light Dependent Resistor

m-Metro

mm-Milímetro

MP_a -Mega pascal

MW -Megawatts
MWh -Megawatts-hora
N_u -Número de Nusselt
N₂ -Azoto
O₂ -Oxigénio
PVD - Physical Vapor Deposition
r - Raio
R_a -Número de Rayleigh
r_r -Raio do aro
SEGS -Solar Energy Generating System
T -Temperatura
U_L -Coeficiente de perda
U_r -Humidade relativa
V -Volt
V_{cc} -Tensão de alimentação
W -Ângulo horário
W_a -Largura do coletor
WRC -World Radiation Center
W/m² -Watts por metro quadrado

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A energia solar é universal, gratuita, não poluente e infinitamente renovável, sendo uma alternativa às fontes energéticas tradicionais nomeadamente sistemas que usam combustíveis fósseis portanto uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos o esgotamento das fontes fósseis. Quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol (Andrade, 2011).

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia. Trata-se de um valor considerável, correspondendo a 10000 vezes o consumo mundial de energia neste período e estima-se que 84 minutos da radiação solar que incide sobre o planeta Terra cobriria a necessidade energética mundial anual (Kalogirou 2009). Este facto vem indicar que, para além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui uma fonte energética inesgotável e havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, eléctrica, etc.).

O consumo desenfreado de energia e a não preocupação com o meio ambiente após a revolução industrial, gerou um aumento acima do normal na concentração de dióxido de carbono (CO_2), devido à queima de combustíveis fósseis. Além disso, a utilização destes combustíveis também acarretou a degradação dos recursos naturais, sendo o principal responsável pelo efeito estufa (Kroth, 2016).

De acordo com o mesmo autor acima citado, cientes dos problemas causados pelo efeito estufa, muitos países assinaram tratados em que são obrigados a se adequar às normas ambientais relacionadas à diminuição da emissão de gases de efeito estufa (GEE), e na pesquisa por novas fontes de energia menos poluidoras. A intenção dos países em frear suas emissões de gases de efeito estufa fez com que houvessem incentivos fiscais e em pesquisas para fontes de energias renováveis, como a energia eólica, energia das marés, energia solar, energia geotérmica e biocombustíveis.

A utilização da energia solar, para facilitar atividades humanas, é utilizada desde os antigos. Esta é usada no aquecimento de água para residências, hotéis, hospitais, por meio de coletores planos. Essa tecnologia evidenciou o seu desenvolvimento nos anos 70 devido á crise energética mundial, fortalecendo assim a procura por fontes de energia alternativas não poluidoras do meio ambiente.

Neste trabalho pretende-se construir e analisar um concentrador cilindro parabólico com seguimento da radiação solar em um grau de liberdade para aquecimento de água a altas temperaturas. O concentrador a ser desenvolvido possui ampla aplicação nas centrais solares para a geração de vapor, que é usado para acionar turbinas para a produção de energia elétrica ou até mesmo dessalinização de água.

O concentrador solar cilindro parabólico, tem como características, o seu formato cilindro parabólico, revestimento reflexivo, em uma linha que está localizada num tubo absorvedor. É indicado para aquecimento de fluído á temperatura dos 400°C (Kroth, 2016).

A ilha de São Vicente possui uma excelente penetração da radiação ao longo de todo o ano, o que torna a aplicação dessa tecnologia viável, sendo que em Cabo Verde utiliza os sistemas tradicionais no aquecimento de água a base de resistência elétrica que apresenta um elevado consumo energético.

1.1 Situação Energética de Cabo Verde

O maior problema que as sociedades em desenvolvimento enfrentam é o da produção de energia necessária capaz de sustentar o seu tecido económico produtivo e, ao mesmo tempo, satisfazer as necessidades das populações num quadro de sustentabilidade económica e ambiental. Uma vez que Cabo Verde não dispõe de reservas de combustíveis fósseis torna-se evidente que as necessidades energéticas terão de ser supridas senão no total mas em parte pelo uso das energias renováveis designadamente a exploração racional da energia eólica e solar que nos foi posto gratuitamente á disposição e em quantidades competitivas.

Cabo Verde, no atual contexto do mercado dos combustíveis fósseis se encontra numa posição desfavorável visto estar na periferia do círculo produção/consumo e os custos relativos a operações de compra/venda de combustível e de tudo o que é inseparável da produção de energia são elevados.

A importação, o armazenamento e a distribuição de combustíveis fósseis em todo o território cabo-verdiano, é assegurada por duas entidades privadas, a Shell (que a partir de 2009 vem abandonando os mercados africanos, inclusive Cabo Verde) e a ENACOL - Empresa Nacional de Combustíveis e lubrificantes privatizada desde 1997, sendo 38.14% das ações pertencentes a empresa angolana Sonangol, 48.3 % a empresa portuguesa Galp e a restante das participações pertencentes ao estado Cabo-verdiano.

Diretamente afetado pelo mercado dos combustíveis, e por outras razões, se encontra a empresa nacional responsável pela produção e distribuição de eletricidade e água a Electra SA, que consome a maior parte do volume de combustível pesado nomeadamente óleo pesado 180 e óleo pesado 380 para a produção de eletricidade e boa parte do gasóleo importado. O fornecimento de eletricidade e água foi concessionado pelo Estado a Electra SA, desde Janeiro 2000, em regime de exclusividade para todo o território, a qual é detida pelo Estado de Cabo Verde (85%) e Municípios de Cabo Verde (15%).

A penetração total de energias renováveis foi, em 2018, de 20,8%, um crescimento de 2,3% em relação à penetração do ano de 2017 (18,5%). No cômputo da produção de energias renováveis registou-se, em relação ao ano anterior, uma variação de 17% (11,9 GWh) na produção eólica e de 38% (2,5 GWh) na produção de energia solar, representando uma evolução positiva da contribuição das energias limpas na satisfação das demandas energéticas do País.

Na Tabela pode se observar a evolução da potência disponível (kW) nos últimos 2 anos pela concessionária de eletricidade nacional, Electra SA:

	2017	2018
Energia Térmica	120 077	124 664
Energia Eólica	600	600
Energia Solar	5 700	6 750
Total	126 377	132 014

Tabela 1: Evolução da Potência disponível (kW) nos anos de 2017-2018

Fonte: Relatório de Contas Eletra SA

1.2 Justificativa

A escolha do tema deu-se primeiramente pelo facto termos um elevado gasto de energia, mais propriamente na fase de produção de vapor para as indústrias. Esta fase consiste no aquecimento do líquido até o ponto de ebulição sob uma pressão constante, que faz com que ele se vaporize. Normalmente as indústrias fazem o uso do vapor para tarefas como aquecimento, esterilização, propulsão, movimento motriz, atomização, limpeza, hidratação e umidificação. São diversas tarefas que implicam um uso exagerado de energia á base de combustíveis fósseis.

Por esse motivo surge a necessidade de procurar por alternativas energéticas para proporcionarem uma certa diminuição nesse uso de combustíveis fósseis, visto que, um dos maiores contribuidores para o aquecimento global são as indústrias com o uso excessivo desses combustíveis.

Logo o uso de um concentrador solar ajudaria muito nessa questão, tanto com a diminuição do consumo de energia, sendo esta uma energia mais limpa a fim de termos menos poluição ambiental.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver e construir um concentrador solar cilindro parabólico para produção de água a altas temperaturas.

1.4 Objetivos Específicos

- ✓ Identificar e descrever as tecnologias que utilizam a energia solar para o aquecimento de água e produção de eletricidade.
- ✓ Descrever os princípios óticos e analisar o ganho térmico de um concentrador solar cilindro parabólico.
- ✓ Dimensionar o concentrador proposto e construir um sistema de orientação em um eixo.
- ✓ Avaliar a viabilidade económica do concentrador cilindro parabólico no aquecimento de água.

1.5 Metodología

A metodologia abordada nesse estudo foi basicamente suportada por uma revisão bibliográfica extensiva sobre os conceitos teóricos relativos aos sistemas disponíveis para a exploração da energia solar com ênfase para o aquecimento de água através das tecnologias dos concentradores cilindros parabólicos.

Essa revisão, foi feita através da consulta de livros, pesquisas na internet, trabalhos académicos, relatórios de testes de alguns componentes, para um melhor entendimento dos conceitos abrangendo os concentradores solares cilindros parabólicos.

Procurou-se examinar a viabilidade da produção de vapor com base num concentrador solar para aquecimento de água servindo de base para o desenvolvimento de um protótipo, permitindo assim fazer ensaios para uma verificação da viabilidade do projeto, apresentado resultados de forma qualitativa, tendo sempre em conta os impactos ambiental, económico e social.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para melhor entender a importância do tema, foi necessário fazer um levantamento da revisão bibliográfica dos principais tópicos que se enquadram neste contexto. Nesse capítulo então pretende-se aprofundar no estudo do recurso solar e os tipos de concentradores existentes, focando mais no concentrador solar cilindro parabólico.

2.1 Recurso Solar

2.1.1 O Sol

Segundo Duffie e Beckman (2013), o sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e é, em média, $1,5 \times 10^{11}$ m da terra. Verifica-se que dois raios luminosos, provenientes das duas extremidades do Sol, podem chegar à Terra com um ângulo máximo, dado pelo quociente entre o diâmetro do Sol e a distância do Sol à Terra, ou seja, $0,53^\circ$. Como visto da terra, o sol gira seu eixo aproximadamente uma vez a cada 4 semanas. No entanto, ele não gira como um corpo sólido. O equador leva cerca de 27 dias e as regiões polares levam cerca de 30 dias para cada rotação. O sol tem uma temperatura efetiva do corpo negro de 5777°K . A temperatura nas regiões do interior central são estimadas variadamente entre 8×10^6 e 40×10^6 K, e a densidade é estimado em cerca de 100 vezes da água.

2.1.2 Radiação Solar Extraterrestre

A radiação emitida pelo Sol, assim como a sua relação espacial com a Terra, resultam numa intensidade da radiação solar praticamente constante fora da atmosfera terrestre. Assim, a constante solar, G_{sc} , representa a energia solar média, por unidade de tempo, recebida por unidade de área perpendicular à direção de propagação da radiação fora da atmosfera terrestre. Após vários estudos efetuados, a World Radiation Center (WRC) determinou, com uma incerteza de 1%, que a radiação extraterrestre seria de 1367 W/m^2 , sendo este o valor adotado para efeitos de cálculo (Duffie e Beckman, 2006).

Segundo os mesmos autores citados acima, considerando a constante solar é possível determinar a radiação extraterrestre, através da qual se calculará a radiação incidente numa determinada superfície alocada no planeta Terra. Entende-se por radiação extraterrestre a radiação que incide na Terra fora da atmosfera. Este parâmetro é obtido pela equação:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot (1,00011 + 0,034221 \cdot \cos(B) + 0,00128 \cdot \sin(B) + 0,000179 \cdot \cos(2B) + 0,000077 \cdot \sin(2B)) \quad (1)$$

sendo B dados pela equação (2.2), na qual n representa o dia do ano (correspondendo ao dia 1 de Janeiro $n = 1$ e ao dia 31 de Dezembro $n = 365$).

$$B = 2\pi \cdot \frac{n-1}{365} \quad (2)$$

Da aplicação da equação acima, para os diferentes dias do ano obtém-se o Gráfico abaixo correspondente à radiação extraterrestre incidente sobre a Terra ao longo do ano.

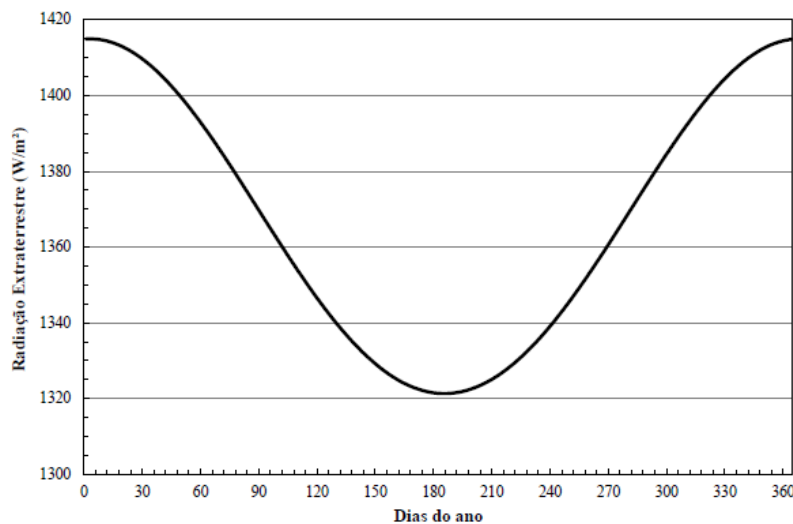


Figura 1: Variação da radiação extraterrestre ao longo do ano

Fonte: Duffie e Beckman, 2006

2.1.3 Radiação Solar Terrestre

A radiação extraterrestre sofre uma série de processos a partir do momento em que entra em contacto com a atmosfera terrestre. Parte dessa radiação é absorvida pelos componentes atmosféricos (O_3 – 0,5 a 3%; O_2 e N_2 – 6 a 8%; H_2O – 3 a 9%; partículas – 1,5 a 10%) e difundida pelos mesmos para o espaço (1,6 a 11%) e para a Terra (5 a 26%) (Stine e Geyer, 2001).

O cientista Hottel apresentou um método para estimar a radiação direta transmitida pela atmosfera, considerando o ângulo de zénite e a altitude para uma atmosfera padrão e para quatro tipos de clima. A transmissão da radiação direta pela atmosfera, τ_b , é dada pela equação (Duffie e Beckman, 2006).

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot \exp\left(-\frac{k}{\cos \theta_z}\right) \quad (3)$$

Assim considerando a transmitância da atmosfera podemos calcular a radiação solar terrestre dado pela seguinte equação:

$$G_{cnb} = G_{on} \cdot \tau_d$$

No caso de uma superfície inclinada a radiação solar é dada pela equação: (4)

$$G_I = G_{on} \cdot \tau_d \cdot \sin \theta \quad (5)$$

2.1.4 Ângulos Solares

As relações geométricas entre um plano, segundo qualquer orientação relativamente à Terra a qualquer hora, e a radiação solar incidente, podem ser definidas em função de uma série de ângulos, tal como é possível observar na Figura 2.8. Os ângulos que definem a incidência da radiação sobre o plano dependem de outros, tais como a declinação solar e o ângulo horário portanto estes serão apresentados inicialmente (Photovoltaic Efficiency, 2013).

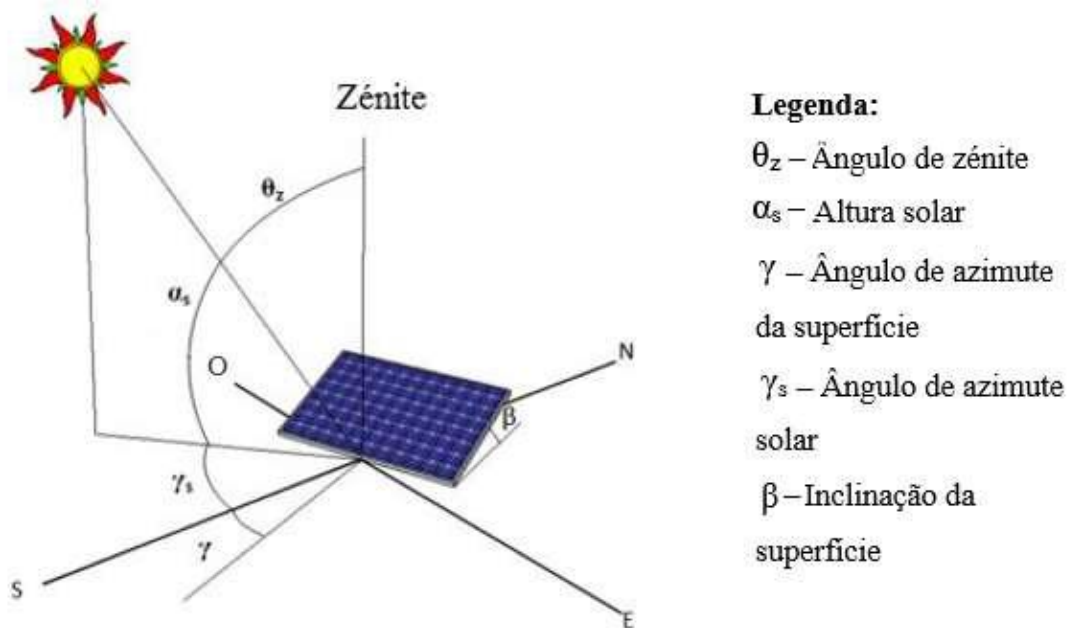


Figura 2: Ângulos solares

Fonte: Photovoltaic Efficiency, 2013

A declinação (δ) é a posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do equador (Norte positivo) e varia de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites: $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

Latitude (ϕ) é fundamental nos cálculos dos ângulos solares e representa a distância ao Equador medida ao longo do meridiano de Greenwich. Esta distância é medida em graus, podendo variar entre 0° e 90° para Norte ou para Sul ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$).

Ângulo horário (ω) representa o deslocamento aparente do Sol sobre o plano da trajetória solar, tendo como origem o meio-dia solar, sendo negativo da parte da manhã e positivo de tarde. Desde o nascer do Sol o seu deslocamento pode ser contabilizado de 15° por hora ($360^\circ/24$ horas).

Ângulo de zénite é definido como o ângulo entre a linha de radiação solar e a vertical, ou seja, o ângulo de incidência dos raios solares numa superfície horizontal.

Ângulo de Azimute é definido como sendo o ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção sul.

A altura solar é o ângulo entre os raios solares e o plano horizontal

ngulo de Incidência é o ângulo entre a radiação direta incidente numa superfície e a normal a essa superfície.

2.2 Radiação Solar em Cabo Verde

De acordo com o estudo realizado como parte integrante do plano energético renovável de Cabo Verde, verifica-se que Cabo Verde tem um recurso solar abundante. As ilhas de Cabo Verde, tem como níveis de radiação global em plano horizontal entre 2070 e 2190 Kwh/m²/ano. Mais de metade de todo o território Cabo-verdiano apresenta um potencial superior a 3750 horas de sol por ano.

Na figura apresenta alguns dados meteorológicos ao longo dos meses em Cabo Verde. Pode-se observar pela figura que Cabo Verde tem uma boa radiação solar diária o que ajuda mais na implementação dos sistemas solares.

	Temperatura do Ar	Humidade relativa	Radiação solar diária - horizontal	Pressão Atmosférica	Velocidade do Vento	Temperatura do Solo	Graus-dia para aquecimento	Refrigeração graus-dias
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Jan	21,7	73,1%	4,63	101,4	7,4	22,9	0	363
Fev	21,3	75,5%	5,49	101,4	6,7	22,2	0	316
Mar	21,5	75,7%	6,57	101,3	6,1	22,2	0	357
Abr	22,1	74,5%	7,61	101,3	6,4	22,5	0	363
Mai	22,7	74,3%	7,76	101,4	6,2	22,8	0	394
Jun	23,6	76,2%	7,22	101,4	6,0	23,4	0	408
Jul	24,6	77,2%	6,70	101,3	4,6	24,5	0	453
Ago	25,8	79,5%	6,08	101,2	4,4	26,0	0	490
Set	26,4	80,9%	6,02	101,2	5,0	26,7	0	492
Out	26,0	78,6%	5,43	101,2	5,7	26,6	0	496
Nov	24,7	75,2%	4,78	101,2	5,9	25,8	0	441
Dez	22,9	74,0%	4,27	101,3	6,6	24,3	0	400
Anual	23,6	76,2%	6,05	101,3	5,9	24,2	0	4 972
Fonte	Solo	NASA	Solo	Solo	NASA	NASA	Solo	Solo
	Medido a			m	10	0		

Tabela 2: Dados Climáticos do Mindelo

Fonte: Retscreen

2.3 Energia Solar

A energia solar constitui atualmente uma das formas de energia renovável mais polivalente, pois além de ser um elemento vital para a vida no nosso planeta, e para todos os processos que a possibilitam, é também uma fonte de energia com diversas formas de aproveitamento, tanto direta como indiretamente [9]. Ainda assim, verifica-se que atualmente o seu aproveitamento está bastante aquém do seu potencial, contribuindo com uma percentagem reduzida na produção de energia elétrica a nível global, quando comparada com as restantes fontes utilizadas (World Energy Outlook, 2016).

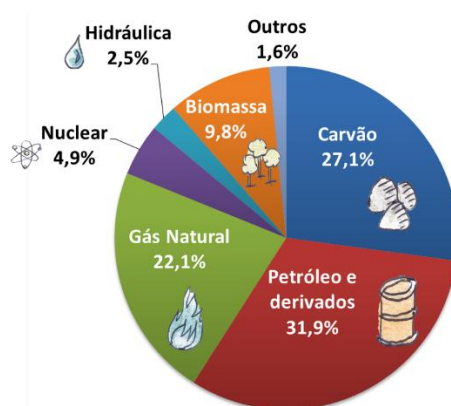


Gráfico 1: Matriz energética mundial em 2016

Fonte: World Energy Outlook, 2016

2.3.1 Energia Solar Passiva

As tecnologias passivas referem-se tipicamente às metodologias, de caráter arquitetónico ou construtivo, que permitem gerir, de forma natural e autónoma, a energia solar e a luminosidade recebidas em função do que se pretende. Um caso prático da utilização passiva de energia solar é o posicionamento e a orientação de determinada habitação, de modo a maximizar a energia recebida no Inverno, quando é necessária, e minimizar a recebida no Verão, quando a necessidade é mais reduzida. Em adição, o emprego de elementos construtivos apropriados, tais como janelas com elevada refletividade ou caixilhos com isolamento térmico, permitem também a gestão desta forma de energia solar (Mazria, 1979).

2.3.2 Energia Solar Ativa

A utilização ativa de energia solar faz uso de sistemas dedicados para a sua absorção e posterior transporte, na forma de energia térmica. Estes sistemas, que empregam fluidos térmicos e elementos mecânicos como bombas circuladoras, usufruem então de um certo grau de liberdade e de uma polivalência que impulsiona este tipo de tecnologias. É da utilização das várias componentes da radiação solar que surgem os sistemas solares térmicos, possibilitando o aquecimento de espaços, de fluidos, como por exemplo água para processos industriais ou para fins domésticos, e ainda a produção de energia elétrica, através de motores térmicos ligados a grupos geradores (Aguiar *et al*, 2001).

2.3.3 Energia Solar Fotovoltaica

Em adição às vertentes passiva e ativa, existe ainda uma outra forma de aproveitamento da energia solar que não se insere nesta categorização, mais concretamente a tecnologia fotovoltaica. Nesta, recorre-se ao efeito fotoelétrico, que consiste na geração de um potencial quando a radiação incidente ioniza uma região próxima da barreira de potencial de um material semicondutor, libertando-se eletrões que criam um fluxo elétrico. Esta barreira de potencial pode ser formada pela deposição de um filme metálico transparente, por evaporação no material semicondutor ou através de uma junção p-n, que consiste na introdução de determinadas impurezas opostas às impurezas do material semicondutor (Rappaport, 1999).

2.4 Sistemas de Aquecimento de Água

Os sistemas de aquecimento de água através da energia solar fazem uso da radiação solar, direta e difusa, que neles incide, transferindo a energia térmica captada para um fluido térmico, que eventualmente irá elevar a temperatura da água, podendo esta ser utilizada para aquecimento de espaços ou de piscinas, em processos industriais ou, mais tipicamente, como AQS (Rodrigues, 2017).

Estes sistemas são geralmente divididos em função da forma como é feita a circulação do fluido térmico, contudo, ambos são essencialmente constituídos pelos mesmos componentes principais. Estes são então o coletor solar, responsável pela transformação da radiação solar recebida em energia térmica, e posteriormente pela sua transferência para o fluido térmico circulante, e o depósito de armazenamento, que permite conservar a água previamente aquecida a temperaturas elevadas (Rodrigues, 2017).

Atualmente estão disponíveis a nível comercial três tipos de coletores solares, que se diferenciam pelo seu princípio de funcionamento.

2.4.1 Coletores Planos

Todos os coletores planos, que estão disponíveis no mercado são de absorvedores normalmente metálicos dentro de uma caixa retangular plana. Os coletores planos são dotados de isolamento térmico, na parte inferior e nos lados. Na parte superior existe uma cobertura transparente. Dois tubos ligados para alimentação e retorno do fluido de transferência térmica estão colocados nos lados do coletor. Quando a radiação solar passa pela cobertura transparente e incide sobre a superfície escurecida do absorvedor caracterizado pelo alto grau de absortividade, uma grande parte desta porção de energia é absorvida pela placa onde é transferida para o fluido de transferência térmica contida nos tubos (Duffie e Beckman, 2006).

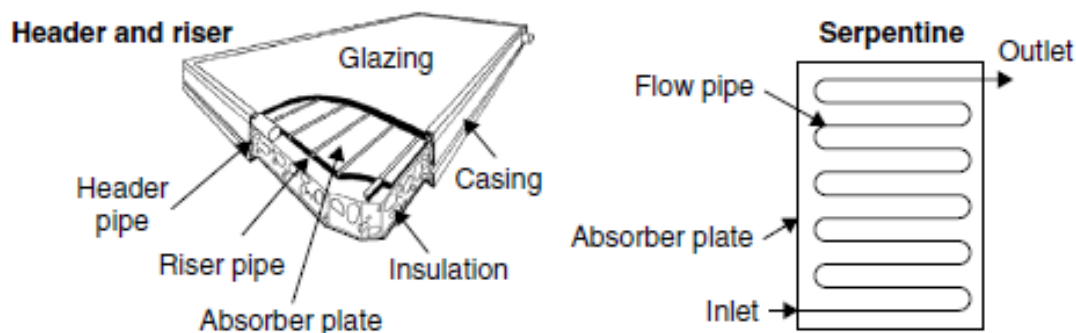


Figura 3: Coletor Plano

Fonte: Kalogirou, 2014

2.4.2 Coletores de Tubos de Vácuo

Estes coletores são compostos por tubos de vidro transparentes, dispostos em paralelo, contendo no seu interior um absorvedor. Este consiste num tubo metálico com aletas e coberto por um filme seletivo, que absorve a radiação solar e reduz tanto a reflexão como a radiação emitida pelo próprio tubo. O interior do tubo de vidro é mantido em vácuo, de forma a se reduzirem as perdas de calor (Rodrigues, 2017).

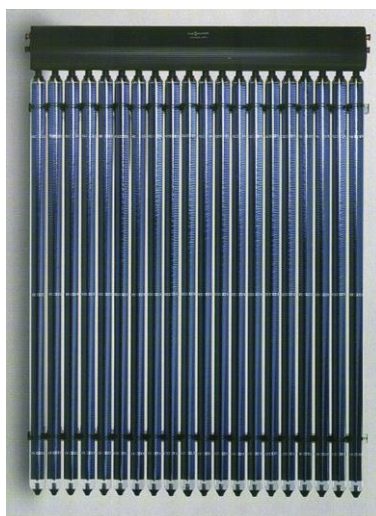


Figura4: Coletores de Tubos de Vácuo

Fonte: Kalogirou, 2014

2.4.3 Coletor Parabólico Composto (CPC)

Esses coletores têm em particular a capacidade de refletir ao absorvedor quase toda a radiação incidente com alto grau de eficiência. Eles podem ser estacionários ou móveis portanto com a possibilidade de rastrear a posição do sol. Coletores do tipo CPC podem aceitar a radiação solar em diferentes ângulos. A configuração interna é caracterizada por vários elementos que favorecem a reflexão da maior parte da radiação solar para o tubo absorvedor localizado no fundo do coletor. O absorvedor assume hoje em dia vários formatos sendo os mais comuns os formatos barra ou cilíndrico.

Para gamas de temperaturas mais altas são instalados sistemas de rastreamento solar com o objetivo de melhorar o desempenho. Os coletores são construídos normalmente como uma unidade com uma abertura e um absorvedor ou como painel (Duffie e Beckman, 2006).

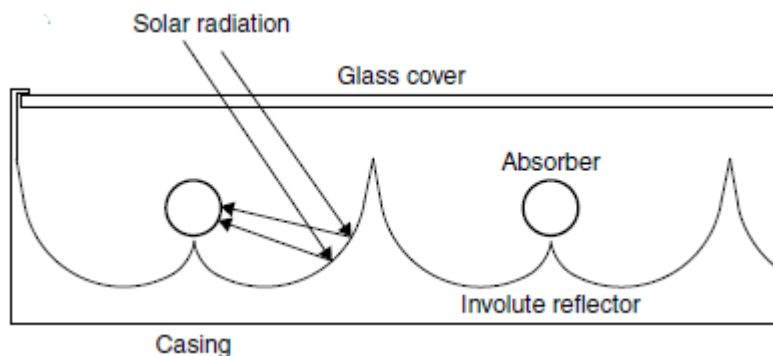


Figura 5: Coletor Parabólico Composto (CPC)

Fonte: Kalogirou, 2014

2.5 Sistemas de Concentração da Radiação Solar

Em termos gerais podemos distinguir os sistemas de concentração em sistemas com um ou dois eixos de seguimento. Os sistemas de seguimento a um eixo concentram os raios solares ao longo de uma linha focal e a dois eixos de seguimento concentram os raios solares num ponto. Além disso, as tecnologias de concentração solar dividem-se em geral em quatro tipos: os heliostatos; concentradores de discos parabólicos; concentradores de Fresnel; e cilindro parabólico (Kalogirou, 2014).

2.5.1 Central de Torre

Nesta tecnologia são usados vários refletores, distribuídos ao longo de um campo de modo a concentrarem os raios solares numa cavidade, como ilustrada na figura abaixo.

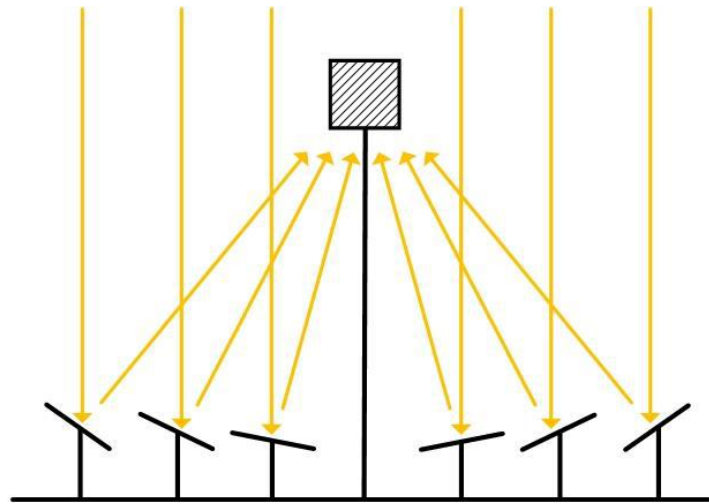


Figura 6: Central de Torre

Fonte: Barbosa, 2015

A este sistema normalmente é acoplado a um ciclo de Rankine através de um sistema de geração de vapor que depois aciona uma turbina à qual está acoplado um gerador para transformar a energia mecânica em energia elétrica (Kalogirou, 2014).

2.5.2 Disco Parabólico

O refletor de disco parabólico é de foco pontual, e tem um seguimento do movimento aparente do sol a dois eixos. Esta geometria de concentração tem normalmente acoplado no foco um motor de Stirling, que converte a energia térmica de alta temperatura em energia mecânica que por sua vez é convertida em energia elétrica através de um gerador elétrico (Kalogirou, 2014).

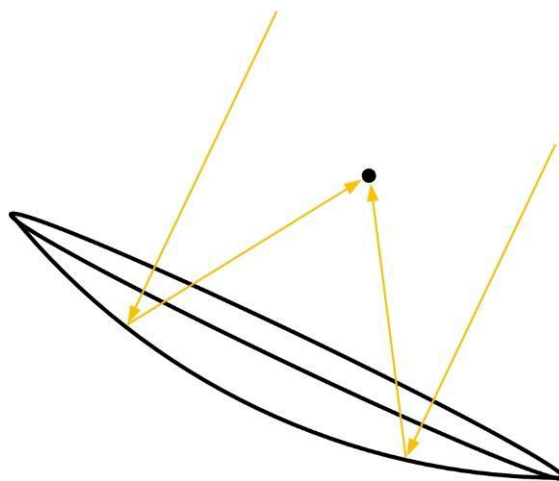


Figura 7: Concentrador de Disco Parabólico

Fonte: Barbosa, 2015

2.5.3 Concentrador Cilindro Parabólico

Os concentradores utilizados nestas centrais são refletores curvos, com o formato de uma parábola, e com coletores tubulares no seu centro. Estes coletores são semelhantes aos coletores de tubos de vácuo aplicados nos sistemas de aquecimento de água, uma vez que funcionam segundo o mesmo princípio. Um tubo metálico coberto por um filme isolante é embutido num tubo de vidro, reduzindo-se simultaneamente as perdas por radiação e por convecção. Estes absorvedores recebem então a radiação solar concentrada numa ordem de 30 a 60 vezes superior à radiação solar recebida diretamente, permitindo que o fluido térmico que neles circula seja aquecido até temperaturas de aproximadamente 390 °C. Posteriormente, o fluido térmico atravessa os permutadores de calor onde é produzido vapor sobreaquecido (tipicamente a 100 bar e 370 °C), que eventualmente produzirá o trabalho necessário para a geração elétrica, por meio de uma turbina de vapor e do ciclo de Rankine. Estes concentradores são dispostos em longas filas e orientados paralelamente ao eixo da Terra, de modo a que possam acompanhar o movimento do Sol, de este para oeste (Price *et al*, 2002).

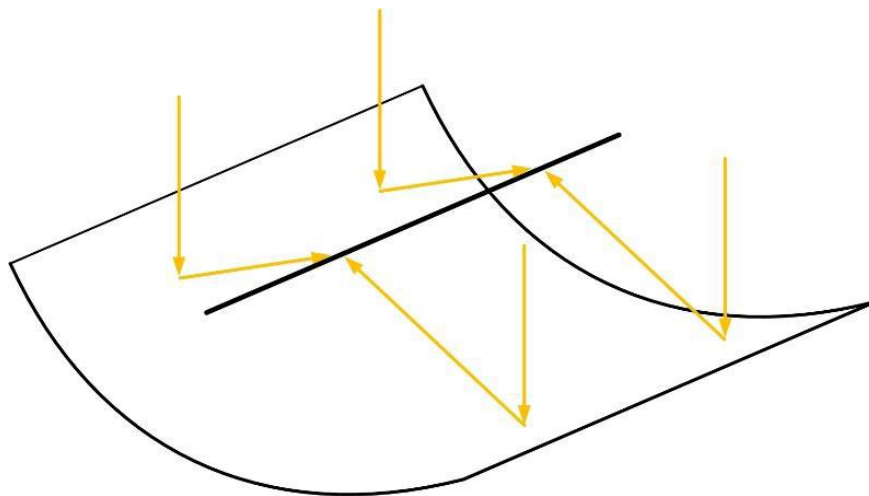


Figura 8: Concentrador Cilindro Parabólico

Fonte: Barbosa, 2015

2.5.4 Concentrador com Refletor Fresnel

Uma central com CLRF funciona do mesmo modo que uma central de concentradores parabólicos lineares, sendo a principal diferença o tipo de refletores utilizados. Os refletores de fresnel permitem simular os refletores parabólicos de grandes dimensões, através da utilização de várias superfícies planas mais pequenas, aplicando-se o princípio das lentes de fresnel.

Ainda que esta alteração nos refletores seja subtil, a mesma tem um elevado impacto nas centrais, uma vez que desta forma se reduzem drasticamente os custos associados ao fabrico das superfícies refletoras, os custos infraestruturais relativos aos seus suportes, e ainda se elimina a necessidade de um absorvedor móvel, derivado do facto de serem os refletores planos a rodarem de forma independente, fazendo o seguimento do Sol (Mills e Morrison, 2000).

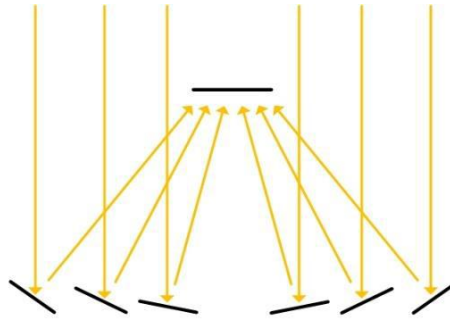


Figura 9: Concentradores de Fresnel

Fonte: Barbosa, 2015

2.6 Concentrador Solar Cilindro Parabólico

Das tecnologias de concentração citadas acima o concentrador cilindro parabólico, conhecido pela sigla CCP, é, sem dúvida a tecnologia mais madura e utilizada até o momento. O maior expoente desta tecnologia é o conjunto de nove centrais termoelétricas instaladas durante os anos 80 no deserto de Mojave na Califórnia, conhecidos como SEGS (Solar Energy Generating System) com mais de 350 MW instalados, (Fernández-García *et al.*, 2010).

O princípio de funcionamento de um CCP baseia-se na propriedade geométrica de que um espelho parabólico reflete para o foco os raios incidentes normais ao plano de abertura da parábola. No foco da parábola localiza-se o elemento absorvedor, que recebe a radiação concentrada e transfere esta energia sob a forma de calor para um fluido de trabalho.

2.6.1 Principais Componentes

O concentrador solar cilindro parabólico é constituído pelos quatro componentes principais:

- ✓ Elementos absorvedores;
- ✓ Refletores cilindro parabólicos;
- ✓ Sistema de rastreamento solar;

- ✓ Estrutura de suporte.

2.6.2 Elemento Absorvedor

O elemento absorvedor é formado por um tubo metálico, localizado no foco da parábola, por onde escoar o fluido de trabalho. Um tubo de vidro, concêntrico ao tubo metálico, o envolve e o espaço anular formado é evacuado. Este vácuo suprime a convecção entre os dois tubos, reduzindo as perdas térmicas para o ambiente.

O tubo metálico absorvedor possui um recobrimento seletivo que confere alta absorvidade da radiação no espectro solar e uma baixa emissividade de radiação infravermelha. Os recobrimentos seletivos mais utilizados são compostos por material do tipo cermet, uma mistura de cerâmica com metal, e são depositados na superfície do tubo pelo processo sputtering, também conhecido por deposição física de vapor, PVD (Physical Vapor Deposition).

A absorvidade de radiação no espectro solar chega a ser maior que 95,5% a 400°C e a emissividade de radiação térmica infravermelha é menor que 9,5%, (Schott Solar, 2013, *apud*, Filho, 2013). Os recobrimentos obtidos por PVD sofrem grande degradação a altas temperaturas quando em contato com o ar, por isso alto vácuo é necessário no espaço entre os dois tubos. Um requisito de projeto importante para recobrimentos seletivos de absorvedores de coletores CCP é que sejam baratos e de fácil fabricação em série, além de serem estáveis se expostos ao ar a temperaturas elevadas, em caso de perda do vácuo, (Kennedy, 2002, *apud*, Filho, 2013).

O tubo de vidro, geralmente de borossilicato, deve possuir alta transmissividade. Para isto eles possuem um tratamento anti-reflexivo nas superfícies interna e externa. Nos tubos de vidro mais modernos utilizados a transmissividade chega a ser próxima de 96,5% para a radiação no espectro solar, (Siemens, 2010).

Como o vidro e o metal possuem coeficientes de dilatação térmica diferentes, existe uma união vidro-metal que deve permitir um pequeno movimento relativo entre eles e ao mesmo tempo garantir a vedação para manter o vácuo. A concentração da radiação solar nestas

uniões causa uma acelerada degradação das mesmas, fazendo com que estas percam o vácuo ou com que o tubo de vidro se quebre. Este é o tipo de falha mais comum reportado pelas grandes centrais heliotérmicas e uma grande fonte de despesas adicionais com reposição como também pela diminuição da performance dos absorvedores trabalhando sem vácuo, (Dudley *et al.*, 1994).

Os elementos absorvedores contam ainda com um componente instalado no espaço anular entre o tubo metálico e o de vidro que ajuda a manter o vácuo, além de indicar a qualidade do vácuo. Este componente, conhecido como *getters*, é um composto químico que captura moléculas de hidrogênio originadas da degradação do fluido de trabalho a altas temperaturas. Estas moléculas de hidrogênio atravessam a parede do tubo metálico e são acumuladas no espaço anular que deve ser evacuado. A perda de vácuo faz com que haja troca de calor por convecção entre os dois tubos, aumentando assim as perdas térmicas totais para o ambiente. Tubos com hidrogênio chegam a ter perdas térmicas quatro vezes maiores do que tubos com o vácuo mantido, (Price et al., 2006).

A temperatura máxima teórica que pode ser alcançada em um recetor, é dada em função da razão da concentração máxima. Sabe-se que caso não existissem perdas térmicas no recetor, tendo em conta que se os raios solares atingissem diretamente no refletor, a temperatura que poderia obter seria muito elevada, tendo em conta que a temperatura no sol é 5777 K. Porém uma vez que na realidade não acontece, foi necessário desenvolver uma expressão matemática que permitisse obter o valor dessa temperatura.

$$T_r = T_{sol} \left[(1 - \eta) \cdot \frac{\eta_{otico}}{\varepsilon_r} \cdot \frac{C}{C_{max}} \right] \quad (6)$$

2.6.3 Refletores Cilindro Parabólico

Os refletores de coletores cilindro parabólico representam, a princípio, aproximadamente 30% do custo do coletor, entretanto, uma vez que o custo da estrutura do coletor está diretamente relacionada ao custo dos refletores, estes podem representar até 75% do custo total dos coletores, (Kennedy e Terwilliger, 2005). Esta constatação instiga o desenvolvimento de novos refletores com menores custos.

Os refletores empregados são, em geral, de três tipos, espelhos de vidro, chapas de alumínio de alta refletividade e películas adesivas espelhadas.

Os mais utilizados em grandes centrais de geração de eletricidade são os de vidro, onde o material refletor é de prata. Os espelhos de vidro possuem alta refletividade, ρ , maior que 95,5%, e grande durabilidade, mas sempre existe o risco de quebras. Alguns fabricantes conseguem obter um fator de precisão geométrica de 99,9%, para cada espelho individual, na reflexão da radiação direta para o absorvedor, (Flabeg, 2013).

As películas adesivas espelhadas estão sendo desenvolvidas por diferentes empresas. Empresas como a 3M e a Reflectech desenvolveram uma tecnologia que emprega várias camadas de materiais poliméricos que têm potencial de atingir até 99% de refletividade no espectro visível, porém com baixa eficiência para ondas curtas, ultravioleta. O maior problema destas películas é a sua baixa durabilidade e o alto grau de sujidade dos espelhos, o que diminui a refletividade e implica em custos adicionais com a limpeza. Entretanto, novos desenvolvimentos mostram que esta tecnologia é uma forte candidata a competir com os espelhos de vidro. Camadas protetoras foram desenvolvidas e prometem aumentar a durabilidade dos mesmos, (Digrazia e Jorgensen, 2010).

As chapas de alumínio de alta refletividade representam uma opção com atrativos econômicos e estruturais pelo fato de serem leves e pela sua flexibilidade, onde a forma parabólica é atingida quando fixada à estrutura. Entretanto, esta tecnologia apresenta problemas de durabilidade ainda não solucionados, (Kennedy & Terwilliger, 2005). A sujeira acumulada nos espelhos, principalmente poeira, reduz a refletividade em torno de 2% ao dia, sendo necessário fazer a limpeza dos mesmos periodicamente, geralmente com água deionizada, (Zarza, 2003). Com relação à limpeza, os espelhos de vidro apresentam a grande vantagem em relação aos outros tipos pois após a limpeza a refletividade retorna ao valor original, enquanto os outros apresentam desgastes. O uso de refletores secundários localizados na parte superior dos tubos absorvedores vem sendo investigado. Com o uso destes refletores a parcela da radiação que não é interceptada pelos tubos é novamente refletida para eles. Um aumento de 1% na eficiência do absorvedor e uma redução de 4%

nas perdas térmicas foi observado, acarretando um aumento de 2% na eficiência total do coletor, (Price *et al.*, 2002).

2.6.4 Sistema de Rastreamento

O sistema de rastreamento solar é responsável por movimentar o sistema de modo a estar sempre na orientação correta em relação ao sol. Os sistemas que buscam as coordenadas solares são, na maioria dos casos, baseados em algoritmos solares, embora também se utilizem outros tipos de sensores, como o utilizado neste trabalho e que será visto no capítulo 3. Alguns algoritmos utilizados atualmente têm precisão de 0,5 minuto de arco, (Blanco-Muriel *et al.*, 2001). O sistema de rastreamento envia um sinal ao sistema de movimentação do CCP. Para a movimentação são utilizados motores elétricos com reduções ou pistões hidráulicos.

2.6.5 Estrutura de Suporte

A estrutura de suporte e sustentação dos coletores deve suportar o próprio peso do sistema e garantir que este não sofra deformações em todas as posições em que o coletor trabalhará. A estrutura deve suportar ainda as cargas de vento, principalmente na primeira linha de coletores, que recebe o vento do campo aberto. As bases de sustentação do coletor são geralmente de concreto armado e a estrutura de sustentação metálica, formada por estruturas treliçadas.

2.6.6 Análise Ótica de um Concentrador Cilindro Parabólico

A Figura abaixo ilustra as principais dimensões de um coletor CCP, onde W_a é a largura do coletor, l é o comprimento, D o diâmetro externo do tubo absorvedor e f é a distância focal. O plano de abertura da parábola é o plano formado pelas quatro extremidades da parábola (Duffie e Beckman, 2006).

Outro parâmetro importante relacionado ao ângulo do arco é a abertura da parábola W_a :

$$W_a = 2r_r \sin(\varphi_r) \quad (10)$$

Substituindo a equação de r_r , Obtém:

$$W_a = \frac{4f \sin(\varphi_r)}{1 + \cos(\varphi_r)} \quad (11)$$

Reduzindo a equação:

$$W_a = 4f \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \quad (12)$$

Sendo:

$$\varphi_r = \sin^{-1} \frac{W_a}{2 \cdot r_r} \quad (13)$$

A razão de concentração é definida como a razão entre a área de abertura e a área do absorvedor.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (14)$$

Para coletores concentradores com rastreamento da posição do sol em apenas um eixo a máxima razão de concentração possível onde é metade do ângulo de aceitação formado entre o plano de abertura do coletor e o disco solar:

$$C_{max} = \frac{1}{\sin(\theta_m)} \quad (15)$$

Sistema rastreamento em único eixo: $C_{m\acute{a}x} = 1/\sin(16) = 216$.

2.6.7 Rendimento Ótico

A eficiência ótica de um coletor concentrador parabólico é definida como a quantidade de energia absorvida pelo absorvedor sobre a energia que incide sobre a área de abertura do coletor. A eficiência ótica depende das propriedades dos materiais envolvidos na construção do coletor, da geometria e das várias imperfeições resultantes da construção do coletor. Na forma de equação a eficiência pode ser descrita como (Sodha *et al*, 1984):

$$\eta_o = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - Af \tan \theta) \cos \theta] \quad (16)$$

ρ = Refletância do espelho concentrador

τ = Transmitância do envoltório de vidro

α = Absortância do absorvedor

γ = Fator de intercepção

Af = Fator geométrico

θ = Ângulo de incidência

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (17)$$

Af : geometria do coletor é representada na equação pelo fator geométrico Af , que representa a redução efetiva da área de abertura em detrimento dos efeitos da anormal incidência, obstruções, sombras e perdas de radiação devidas ao efeito de extremidade.

$$A_f = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \quad (18)$$

W_a : Largura da abertura do coletor

h_p = Altura da parábola

f = Distância focal

O parâmetro mais complexo envolvido na determinação da eficiência ótica de um coletor concentrador parabólico é o fator de intercepção. Que é definido como a razão entre a energia absorvida pelo absorvedor e a energia refletida pela superfície da parábola. O fator de intercepção depende do comprimento do coletor, erros no ângulo da parábola e da radiação solar. Os erros relativos a superfície refletora podem ser de dois tipos, aleatórios e não aleatórios.

Os erros aleatórios são calculados estatisticamente, pela determinação do desvio padrão da quantidade total da energia refletida e é dado como:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4\sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2} \quad (19)$$

2.6.8 Análise Térmica

O método para calcular perdas térmicas de recetores de coletores concentradores não pode ser tão facilmente resumido quanto os de placa plana, porque muitos modelos e configurações estão disponíveis. Sendo assim o coeficiente de perdas em um concentrador é dado pela seguinte equação 20 (Duffie e Beckman, 2006).

$$U_L = h_w + h_r + h_c \quad (20)$$

Usualmente, para reduzir a perdas térmicas um tubo de vidro concêntrico é empregado com a finalidade de proteger e diminuir as perdas por convecção entre o absorvedor e o ambiente. O espaço entre o absorvedor e o envoltório normalmente é evacuado eliminando as perdas por convecção do mesmo modo para coletores que contenham ar no envoltório as perdas por convecção entre o absorvedor e o ambiente são negligenciados. Neste caso U_L , baseado na área do absorvedor, e é dado como:

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (21)$$

O coeficiente de transferência por radiação é dado pela seguinte equação:

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma (T_r^2 + T_c^2)(T_r + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)} \quad (22)$$

No caso do coeficiente de transferência por convecção aplica-se a seguinte equação:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (23)$$

Uma vez que o recetor pode ser tratado como um cilindro horizontal, o número de Nusselt é obtido pela equação (3.27), cujos quocientes são dados pela Tabela 3.

$$Nu_D = C \cdot (Gr_D \cdot Pr)^n$$

Ra_D	C	N
$10^{-10} < Ra_D < 10^{-2}$	0,675	0,058
$10^{-2} < Ra_D < 10^2$	1,020	0,148
$10^2 < Ra_D < 10^4$	0,850	0,188
$10^4 < Ra_D < 10^7$	0,480	0,250
$10^7 < Ra_D < 10^{12}$	0,125	0,333

Tabela 3: Coeficientes C e n para cilindros horizontais

Flnte: Barbosa, 2015

Sabendo que o número de Rayleigh (Ra) é dado em função do número de Prandtl (Pr) e do número de Grashof (Gr) pela equação (24), e que este último pode ser calculado pela expressão (25), é possível obter o coeficiente de convecção natural.

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (24)$$

$$Gr_D = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{rec} - T_{amb}) \cdot D^3}{\nu^2} \quad (25)$$

O Calor útil num concentrador cilindro parabólico é dado pela equação 26 ou 27.

$$Q_u = G_B \eta_o A_a - A_r U_L (T_r - T_a) \quad (26)$$

$$Q_u = (\dot{m} c_p)_c (T_o - T_i) \quad (27)$$

2.7 Sistema de Controlo

2.7.1 Arduíno

O Arduíno é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e o software fáceis de usar. As placas do Arduíno são capazes de ler entradas - luz em um sensor, um dedo em um botão ou uma mensagem no Twitter e transformá-lo em uma saída, ativando um motor, ligando um LED, publicando algo online. Você pode dizer à sua placa o que fazer enviando um conjunto de instruções ao microcontrolador na placa. Para fazer isso, você usa a linguagem de programação do Arduíno (com base na fiação) e o Software Arduíno (IDE), com base no processamento (Arduíno, 2012).

2.7.1.1 Hardware do Arduíno

A estrutura física do Arduíno consiste em um microcontrolador com componentes complementares para facilitar o controle de entrada e saída de dados, que pode trabalhar em conjunto com um programa executado em um computador ou em modo standalone

(autônomo). As suas especificações estão disponíveis sob licença da Creative Commons. A Figura abaixo apresenta uma placa Arduino Uno.

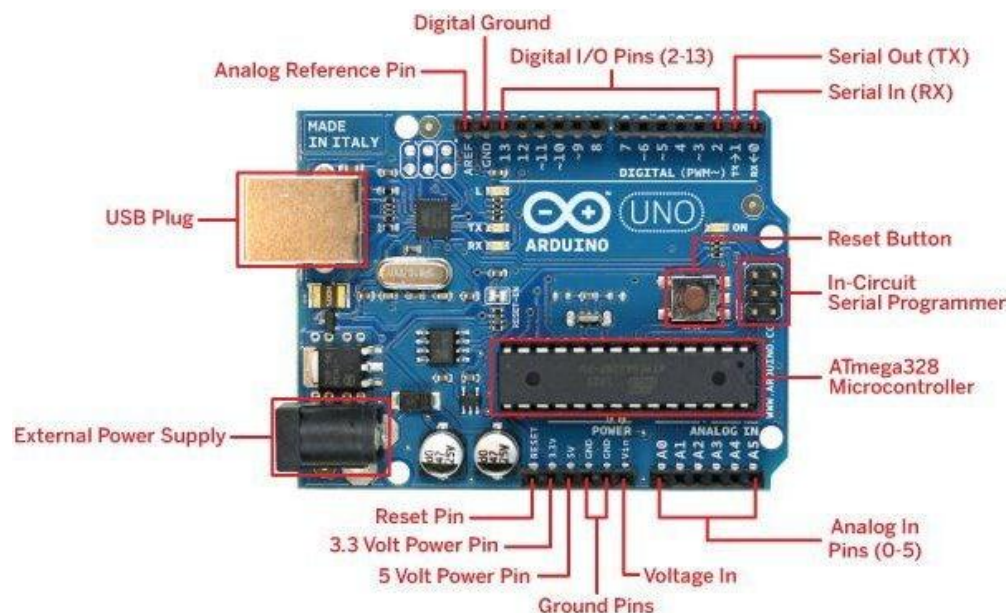


Figura 11: Arduino Uno R3

Fonte: www.arduino.cc

O hardware do Arduino está organizado de forma que suas funções possam ser expandidas por meio de placas específicas (shields), que provêm outros recursos como conexão ethernet ou wireless. Atualmente o acesso à programação do microcontrolador é realizado por meio de conexão USB, dispensando o uso de dispositivos programadores específicos.

2.7.1.2 Software do Arduino

O ambiente de programação do Arduino consiste de uma IDE (Integrated Development Environment) desenvolvida em Java, que é baseada no Processing e na linguagem Arduino, derivada do Wiring, que é baseada em C/C++ (Kato, 2010). A Figura abaixo apresenta o ambiente de desenvolvimento do kit Arduino com um exemplo de código escrito na linguagem de programação específica para o Arduino.

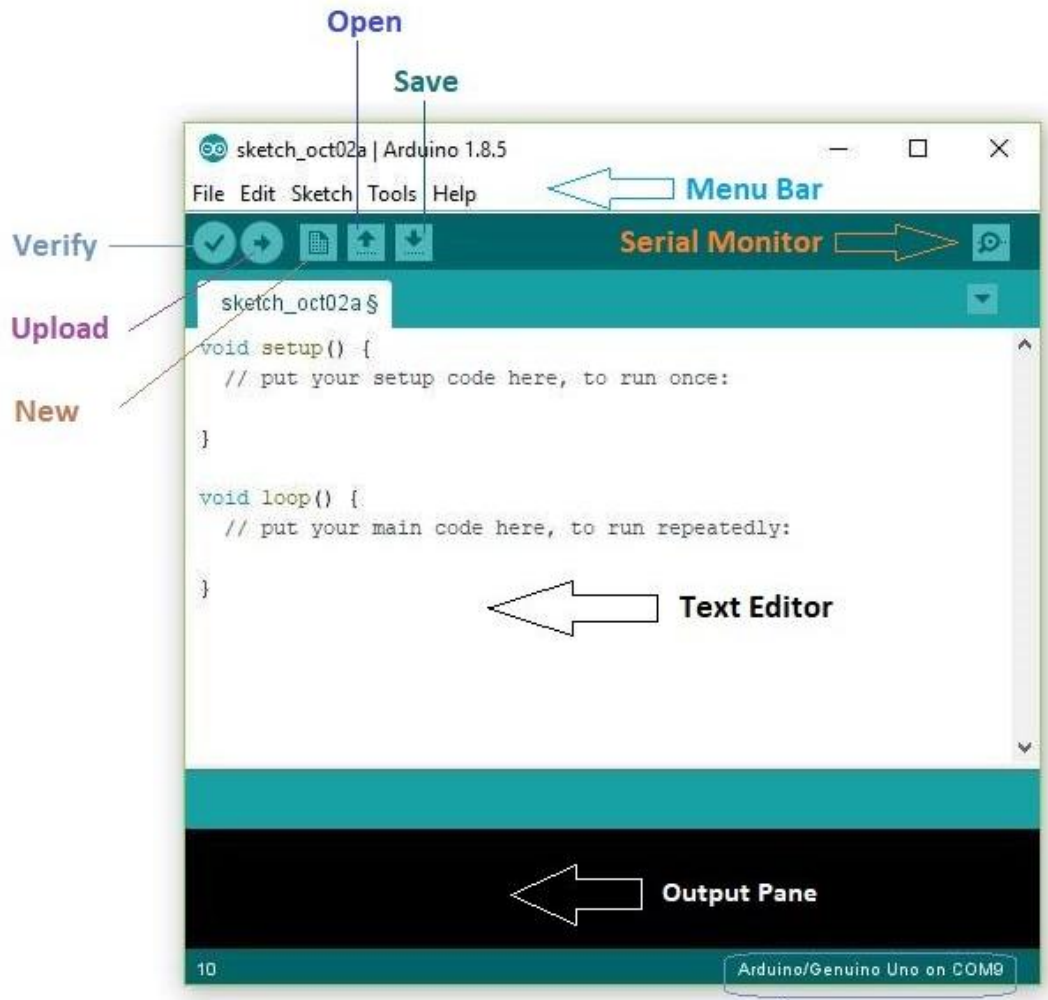


Figura 12: IDE Arduino

Fonte: www.arduino.cc

O desenvolvimento ocorre pela criação do código do programa (sketch), compilação e gravação do mesmo no microcontrolador. Esse é o papel fundamental do ambiente de desenvolvimento que, utilizando ferramentas livres, verifica o código, transforma-o em C/C++ e em seguida faz a sua compilação gerando um arquivo hex que será gravado no microcontrolador.

2.7.2 Sensor

Sensor é definido como sendo um dispositivo sensível a um fenómeno físico, tais como: temperatura, humidade, luz, pressão, entre outros. Por meio desta sensibilidade, os sensores enviam um sinal, que pode ser um simples abrir e fechar de contatos, para os dispositivos de medição e controle. Ou, caso exista a necessidade de medir uma grandeza elétrica (como por exemplo: corrente) a partir de um fenómeno físico qualquer envolvendo grandezas físicas que não sejam de natureza elétrica, tem-se, conceitualmente, a necessidade de utilizar um transdutor, que se caracteriza por um dispositivo capaz de responder ao fenómeno físico, ou estímulo, de forma a converter sua magnitude em um sinal elétrico conhecido, proporcional à amplitude desse estímulo. Os transdutores também são conhecidos como conversores de sinais (Silveira e Santos, 2002).

2.7.2.1 Sensor DHT11

O DHT11 é composto por um sensor capacitivo de humidade relativa (%UR) e um termistor temperatura (°C). Possui internamente um microcontrolador de 8 bits que facilita sua utilização tratando o sinal de resposta de forma digital. É composto por quatro terminais: o primeiro, da esquerda para direita, para alimentação (Vcc), o segundo para dados, o terceiro não é utilizado e o quarto para a terra (GND) (Cantú, 2013).

A seguir, algumas especificações:

- Modelo: DHT11
- Alimentação: 3,0 a 5,0 VDC (5,5 Vdc máximo)
- Corrente: 200uA a 500mA, em stand by de 100uA a 150 uA
- Faixa de medição de umidade: 20 a 90% UR
- Faixa de medição de temperatura: 0° a 50°C
- Precisão de umidade de medição: $\pm 5,0\%$ UR
- Precisão de medição de temperatura: ± 2.0 °C
- Tempo de resposta: < 5s
- Dimensões: 23mm x 12mm x 5mm (incluindo terminais).

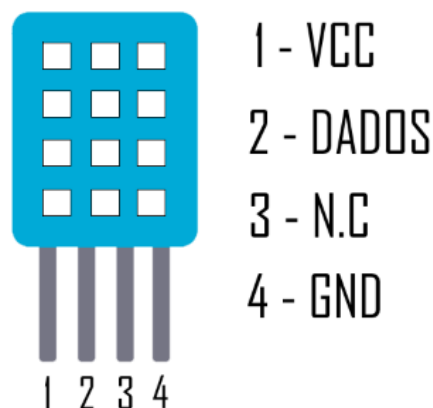


Figura 13: Pinos sensor DHT11

Fonte: Electronics, 2010

2.7.2.2 Sensor de Fluxo de Água YF-S201

O sensor de fluxo de água YF-S201 consiste de uma carcaça plástica, um rotor e um sensor de efeito Hall¹. Conforme o fluxo de água passa pela câmara de água do sensor, faz movimentar as pás acopladas ao rotor. A medida com que a vazão de água aumenta, a velocidade com que o rotor gira aumenta proporcionalmente. O sensor de efeito Hall detecta quando o rotor com as pás completa um giro. Assim que essa volta completa é detectada, o sensor de efeito Hall envia um pulso de 5V no cabo de saída do sensor. Essa descrição de funcionamento é ilustrada pela Figura abaixo. (Zanuzzo, 2017).

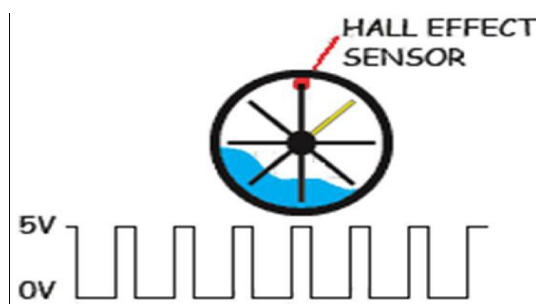


Figura 14: Funcionamento do Sensor de Fluxo de Água

Fonte: Rocha *et al*, 2014

¹ É um transdutor que, quando sob a aplicação de um campo magnético, responde com uma variação em sua tensão de saída.

De acordo com o autor citado acima o sensor é capaz de trabalhar em uma vazão de até 30 L por minuto, com uma pressão não superior a 1,75 MP_a e possui uma margem de erros de aproximadamente 3%.

A escolha desse sensor deu-se pelo fato do seu excelente custo benefício, já que possui valor baixo, mas é capaz de atender as especificações do projeto.

Características:

- Material: plástico monocristalino (transparente)
- Tensão de funcionamento: 5 a 15VDC
- Máxima corrente de operação: 15 mA (5VDC).
- Pressão suportada: até 1,75MP_a
- Faixa de vazão medida: 1 a 30L/min
- Características de fluxo de pulso (5xQ): $Q = L/Min \pm 3\%$
- Diâmetro do tubo: 1/2"
- Dimensões aproximadamente: 54mm x 29mm

2.7.2.2 Sensor de Temperatura DS18B20

O Sensor de Temperatura DS18B20 além da sua excelente precisão é que o mesmo permite fazer leituras de 9 a 12 bits (configurável) de resolução. Cada sensor DS18B20 possui um endereço serial exclusivo de 64 bits e comunicação através de um único fio (*one Wire*²), de modo que, o desenvolvedor, pode colocar vários sensores em um mesmo barramento, utilizando apenas uma única porta do microcontrolador e obter os valores de temperatura de cada sensor separadamente. O sensor conta também com uma função conhecida como parasite power e essa função permite que a alimentação do sensor seja feita a partir de um barramento de dados sem necessidade de alimentar externamente.

² É um pequeno acessório utilizado em funções digitais e também em instrumentos de medição de temperatura.



Figura 15: Sensor de Temperatura DS18B20

Fonte: Portal.vidadesilicio.com.br

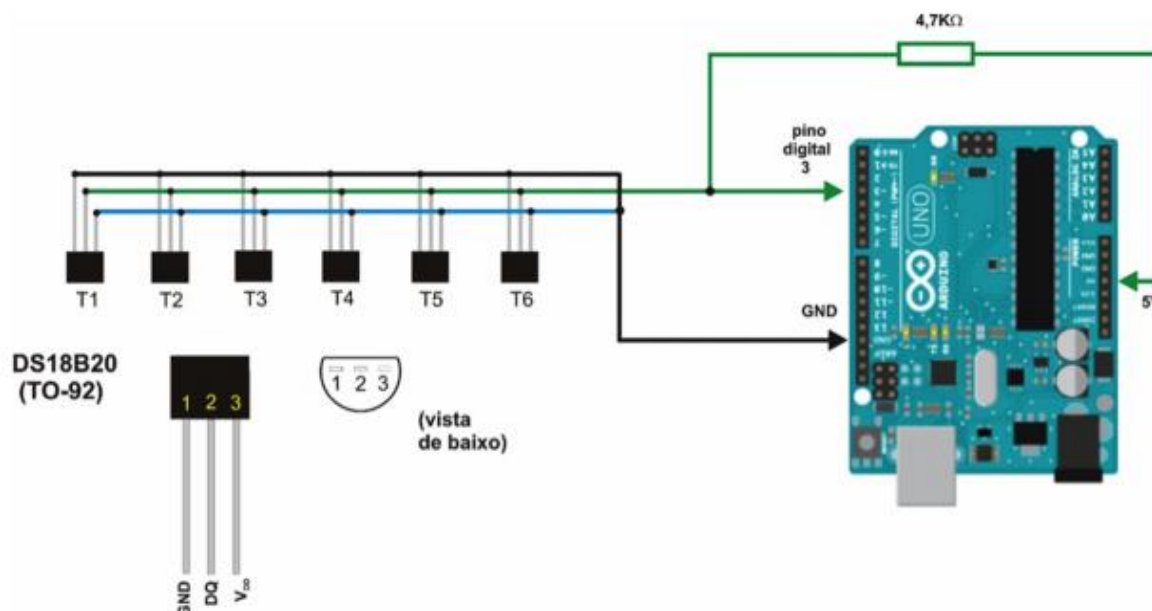


Figura 16: Detalhes das conexões elétricas do sensor DS18B20 e seus terminais

Fonte: Amorim et al., 2015

Especificações e características:

Tensão de operação: 3 – 5,5VDC

Faixa de medição: -55°C a 125° celsius (recomenda-se no máximo 100°)

Precisão: $\pm 0,5^\circ$ celsius

Resolução: 9 ou 12 bits (configurável)

Período de atualização: menor que 750ms

Encapsulamento em aço inoxidável

Dimensão do encapsulamento: 6mm x 50mm

Comprimento do cabo: 1m

2.7.2.3 LDR

O LDR (Light Dependent Resistor) é um componente cuja resistência varia de acordo com a intensidade da luz. Quanto mais luz incidir sobre o componente, menor a resistência, ou seja, ele detecta o quanto de luz há em um ambiente. Possui um pino para alimentação e outro para leitura.



Figura: 17 Sensor LDR

Fonte: <https://goo.gl/WxpxnR>

Especificações:

Modelo: GL5528

Diâmetro: 5mm

Tensão máxima: 150VDC

Potência máxima: 100mW

Tensão de operação: -30°C a 70°C

Espectro: 540nm

Comprimento com terminais: 32mm

Resistência no escuro: 1 M Ω (Lux 0)

Resistência na luz: 10-20 K Ω (Lux 10)

CAPÍTULO III: DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

3.1 Descrição do Sistema

No concentrador a radiação solar é refletida para o seu ponto focal, onde encontra o tubo absorvedor. Este é construído com um material que apresenta alta absorvência, permitindo aquecer o fluido que circula no mesmo.

O sistema possui um seguidor solar de um eixo com orientação Norte-Sul, permitindo assim melhorar a eficiência no aquecimento do fluido. Para realizar o algoritmo de controle do seguidor solar, é instalado no concentrador dois sensores LDR. Além desses sensores, no sistema é incorporado um conjunto de sensores (sensor de temperatura, pressão e caudal) para medir as variáveis físicas do protótipo.

A leitura dos sensores é efetuada pelo microcontrolador Arduíno.

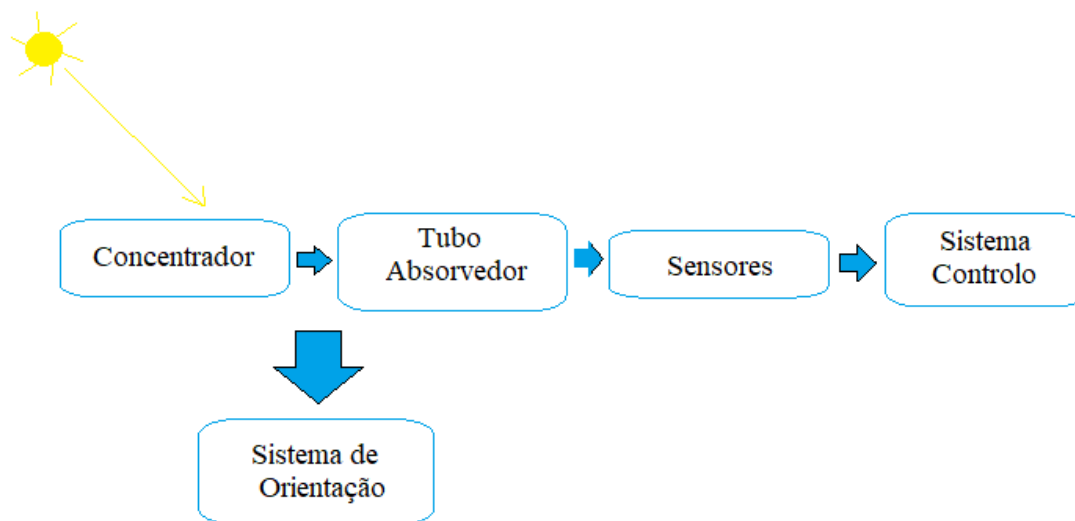


Figura 18: Descrição do Sistema

Fonte: Própria

3.2 Concentrador

Por ser um protótipo de pequena escala, na figura abaixo mostra as dimensões do concentrador, sendo assim é possível realizar o dimensionamento do sistema com base nas equações definidas no estado de arte.

O concentrador é construído de plástico com uma espessura 3_{mm} . Por causa da indisponibilidade de materiais refletivos de alta eficiência no mercado, optou-se por utilizar uma película de alumínio polido que apresenta uma refletância de 85% e apresenta baixo custo. É de notar que a construção do concentrador com essas dimensões terá fortes implicações na diminuição da eficiência ótica do mesmo.

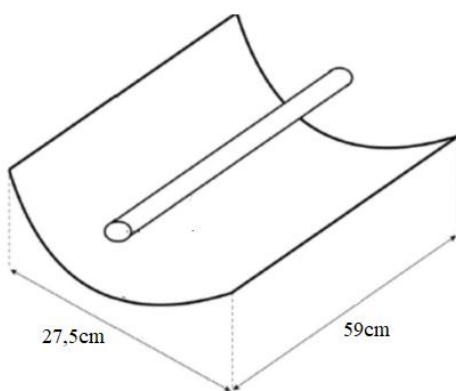


Figura 19: Dimensões do Concentrador

Fonte: Própria

Devido ao facto que em São Vicente em áreas próximas ao mar, os materiais sofrem alto risco de corrosão. Sendo assim, para a estrutura de suporte do concentrador, utilizou uma barra de ferro galvanizado de 20_{mm} de largura e 3_{mm} de espessura. A figura abaixo mostra a estrutura do concentrador desenhado no software SolidWorks.

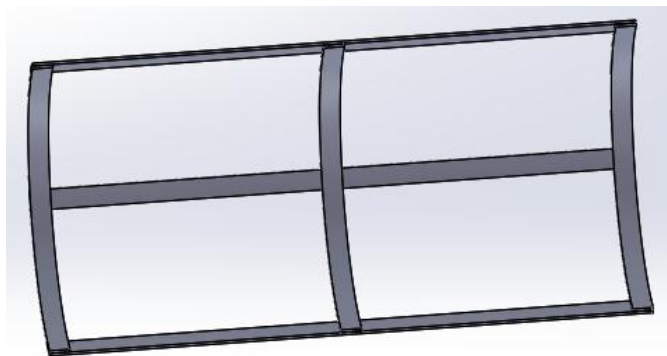


Figura 20: Estrutura do Concentrador

Fonte: Própria

O concentrador possui uma estrutura de apoio que suporta todo o sistema. Para construir a estrutura de apoio do concentrador, de forma a permitir o acompanhamento do sistema desde o nascer até ao pôr-do-sol, na estrutura do concentrador é colocado um eixo permitindo assim a movimentação do sistema. Para que o eixo girasse de forma livremente, foi introduzido dois rolamentos que são assim fixados em cima de uma torre que é fixada no solo. Esta foi construída com tubo de ferro de 40_{mm}x40_{mm} e na base uma chapa de 150mmx 150mm.

3.3 Análise Ótica do Protótipo

Com base nas pesquisas realizadas ao longo deste trabalho, um ângulo de borda de 35° apresenta um maior aproveitamento da radiação solar.

Utilizando a equação 12, a distância focal é dada pela seguinte equação abaixo:

$$f = \frac{w_a}{4 \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)}$$

$$f = \frac{27,5}{4 \tan\left(\frac{35}{2}\right)} = 21,8 \text{ cm}$$

Para calcular o parâmetro r_r usou a equação 9:

$$r_r = \frac{w_a}{2 \cdot \sin \varphi_r}$$

$$r_r = \frac{27,5}{2 \cdot \sin 35} = 24 \text{ cm}$$

Para calcular o diâmetro mínimo do recetor (tubo absorvedor) para intercetar a radiação solar em todas as direções, aplica-se a equação x, em que o ângulo θ_m é 0, 267°.

$$D = 2 \times 24 \times \sin 0,267 = 0,22 \text{ cm}$$

É notável que um tubo de reduzidas dimensões consegue absorver uma boa quantidade de calor, sem que haja grandes perdas. Neste protótipo optou-se por utilizar um tubo de 0,5cm de diâmetro.

Tendo as dimensões do concentrador e do tubo absorvedor, é possível calcular a razão da concentração.

$$C = \frac{A_c}{A_r} = \frac{0,255}{0,0185} = 13,9$$

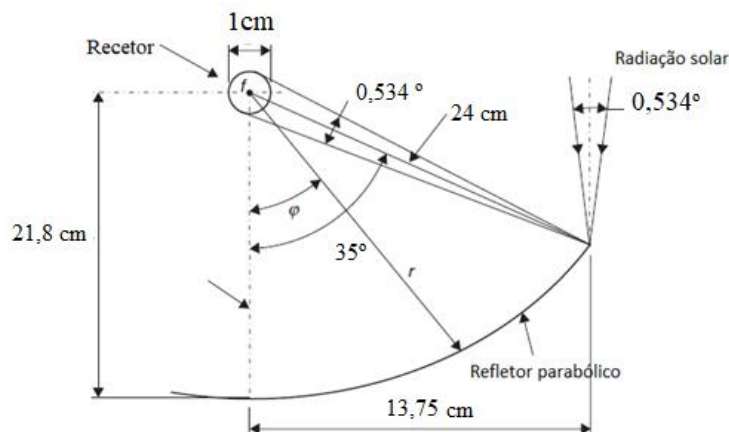


Figura 21: Parâmetros da análise ótica do sistema

Fonte: Própria

3.5 Tubo Absorvedor

Foi utilizado um tubo absorvedor de cobre, por ser um bom condutor de calor. O cobre possui condutibilidade térmica de 385 W/m.K. O tubo de cobre foi revestido com uma tinta preta, no qual possui uma alta absorptância (0,97).

Para diminuir as perdas de calor por convecção seria ideal colocar um tubo de vidro envolvendo o tubo de cobre.

3.6 Balanço Energético do Protótipo

Para realizar o balanço térmico do protótipo, utilizou-se dados da radiação solar no Mindelo no dia 1 de Setembro recolhidos num período das 08h às 16h, que foram retirados do site meteblue³. A partir desses dados calculou-se o calor solar no concentrador em função da sua área como mostra a tabela abaixo.

³ É um serviço meteorológico criado na universidade de Basel na Suíça.

Horas	Radiação solar (W/m²)	Q_s (W/m²)
08:00	225	57.375
09:00	416	106.08
10:00	644	164.22
11:00	789	201.195
12:00	942	240.21
13:00	912	232.56
14:00	870	221.85
15:00	630	160.65
16:00	395	100.725

Tabela 4: Calor solar no concentrador no dia 1 de setembro 2019

Fonte: Própria

A eficiência ótica do concentrador foi calculada com base nos seguintes parâmetros:

- Refletividade do concentrador 85%
- Absortância do recetor 97%
- $Af = \frac{2}{3} \times 0.275 \times 0.12 + 0.218 \times 0.275 \left[1 + \frac{0.275^2}{48 \times 0.218^2} \right] = 0.0837$
- Fator de intercepção de 95%
- Ângulo de incidência dada em função da equação de Cos θ para seguidores solares horizontal no sentido Norte-Sul.

Sendo assim esses dados foram inseridos numa folha Excel, em que a eficiência média foi de 74% conforme mostra a tabela á baixo.

Horas	Radiação Solar	CosΘ	Rendimento Ótico
08:00	225	0.954072	0.71
09:00	416	0.988834	0.75
10:00	644	0.980105	0.74
11:00	789	0.958606	0.72
12:00	942	1	0.77
13:00	912	0.958606	0.72
14:00	870	0.980105	0.74
15:00	630	0.988834	0.75
16:00	395	0.954072	0.71

Tabela 5: Rendimento ótico do sistema

Fonte: Própria

Para calcular o coeficiente de perda de calor por convecção, utilizou-se os seguintes parâmetros da água dada na tabela abaixo e considerando o ângulo de incidência de 90°.

Propriedade	Símbolo	Valor
Densidade	ρ (kg/m ³)	1000
Capacidade Calorífica	c_p (kJ/kg °K)	4,18
Viscosidade cinemática	ν (m ² /s)	$1,006 \times 10^{-6}$
Difusividade térmica	α (m ² /s)	$1,430 \times 10^{-7}$
Condutividade térmica	k (W/m.°K)	0,597
Número Prandtl	...	7,02

Tabela 6: Propriedades Físicas da Água

Fonte: Kalogirou, 2014

$$G_r = \frac{9,8 \times 90 \times (80,1 - 20) \times 5 \times 10^{-3}}{1,006 \times 10^{-6}} = 1317301,193$$

$$R_a = 7,02 \times 1317301,193 = 9,25 \times 10^6$$

Com base dos dados da tabela 3 o parâmetro C é 0,48 e N é 0,25

$$N_u = 0,48 \times (1317301,193 \times 7,02)^{0,25} = 2,65$$

$$h = \frac{2,65 \times 0,597}{0,005} = 3,164 [w/m^2 \cdot k]$$

3.7 Seguidor Solar

Para melhorar assim a eficiência do protótipo, optou-se por projetar um seguidor solar de um eixo. O controlo do seguidor solar é efetuada em malha fechada, ou seja, a realimentação é promovida com sensores de luminosidade e essa informação é analisada pelo controlador no sentido de direcionar o sistema ao sol. Mas é de salientar que a aplicação dos sensores pode ser efetuada pelas nuvens e outras condições climatéricas pondo em causa a precisão do seguidor solar.

No seguidor solar utilizou dois sensores LDR, que são separados por uma pequena pala de madeira causando assim um efeito de sombreamento para garantir assim uma maior precisão na leitura dos sensores posicionados na direção Este-Oeste.

Os sensores foram desenvolvidos a partir de um circuito divisor de tensão, conforme mostra a figura abaixo. Partindo do princípio que quanto maior a incidência de luz sobre o LDR, maior sua resistência, a variação da intensidade da luz sobre o LDR pode ser medida pelo microcontrolador a partir da variação da tensão.

Para realizar a movimentação do concentrador, utilizou-se um servo motor que garante assim a movimentação do sistema para o sol. O controlo do seguidor solar é realizado pelo microcontrolador Arduíno, em que as informações dadas pelos sensores LDR realizam a ativação do módulo relé, ligando assim o servo motor. O diagrama de blocos mostra a estrutura do seguidor solar.

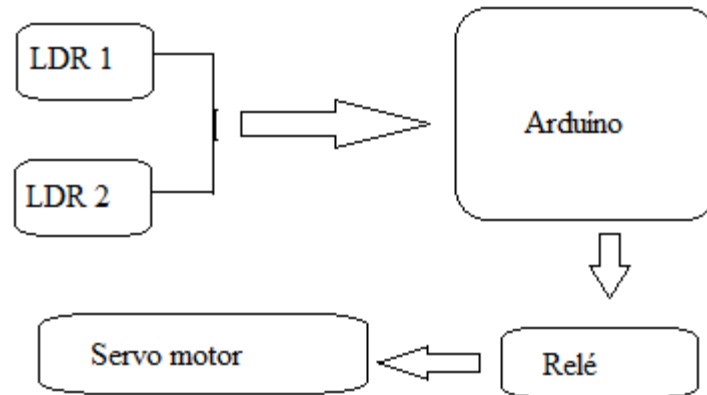


Figura 22: Diagrama bloco do seguidor solar

Fonte: Própria

3.7.1 Programação no Arduíno

A programação do seguidor solar foi feita com a utilização da linguagem de programação da plataforma de desenvolvimento do Arduíno.

A programação do código no Arduíno foi feita com base no diagrama abaixo.

Ao iniciar a execução do código, é feita uma leitura nas portas analógicas 0 e 1 em que está os sensores que indicam a posição do Sol. Nesta leitura são obtidos valores que podem variar de 0 á 1023, de acordo com a tensão aplicada nos LDRs. A relação entre a tensão no valor lido é dado pela equação abaixo.

$$Valor\ da\ leitura = \frac{Tensão(v)}{5(v) \times 1023}$$

Se houver a necessidade de movimentar o concentrador, um sinal PWM é enviada ao servo motor durante dois segundos. Este tempo equivale a uma movimentação aproximadamente de 15 graus do concentrador.

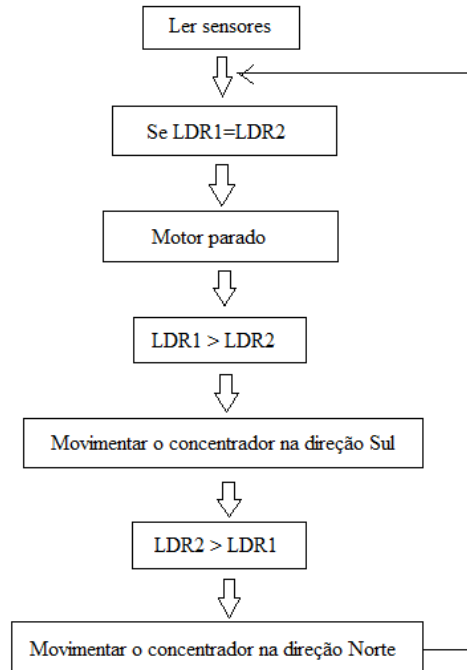


Figura 23 Algoritmo controlo do seguidor solar

Fonte: Própria

3.7.2 Código

```

#include <Servo.h>

Servo myservo;

int pos = 90; // initial position
int sens1 = A0; // LRD 1 pin
int sens2 = A1; //LDR 2 pin
int tolerance = 2;

void setup()
{
  myservo.attach(9);
  pinMode(sens1, INPUT);
  pinMode(sens2, INPUT);
  myservo.write(pos);
  delay(2000); }

```

```

void loop() {
  int val1 = analogRead(sens1);

  int val2 = analogRead(sens2);

  if((abs(val1 - val2) <= tolerance) || (abs(val2 - val1) <= tolerance)) {
  } else {
    if(val1 > val2)
    { pos = -pos; }
    if(val1 < val2)
    { pos = ++pos; }}
    if(pos > 180) { pos = 180; }
    if(pos < 0) { pos = 0; }
    myservo.write(pos);

    delay(5000);}

```

No código a “POS” é a variável que determina a posição inicial do servo motor, que irá ser 90°, ou seja mesmo a meio da amplitude total do servo motor.

Os dois LDR's (Resistência dependente de luz) são conectados respetivamente no pin A0 e no pin A1 da placa Arduino.

A tolerância é a variável, como o próprio nome indica, que ajusta a tolerância, pois sem esta variável a posição do seguidor solar estaria continuamente a ser ajustada ao sol sem parar.

Na função setup () determinamos os pinos onde os dois LDR's foram conectados, e a posição do servo motor a 90°(no meio), aguardando depois dois segundos antes da execução do código na função loop () ser iniciado.

Na função de loop () vamos ler os valores recebidos dos 2 sensores de luz e ajustar o painel solar de acordo com esses valores obtidos.

3.7.3 Circuito do Seguidor Solar

No seguidor solar foi utilizado os seguintes materiais:

- 2 LDR
- 2 Resistores de 10K
- 1 Servo motor
- 1 Módulo relé

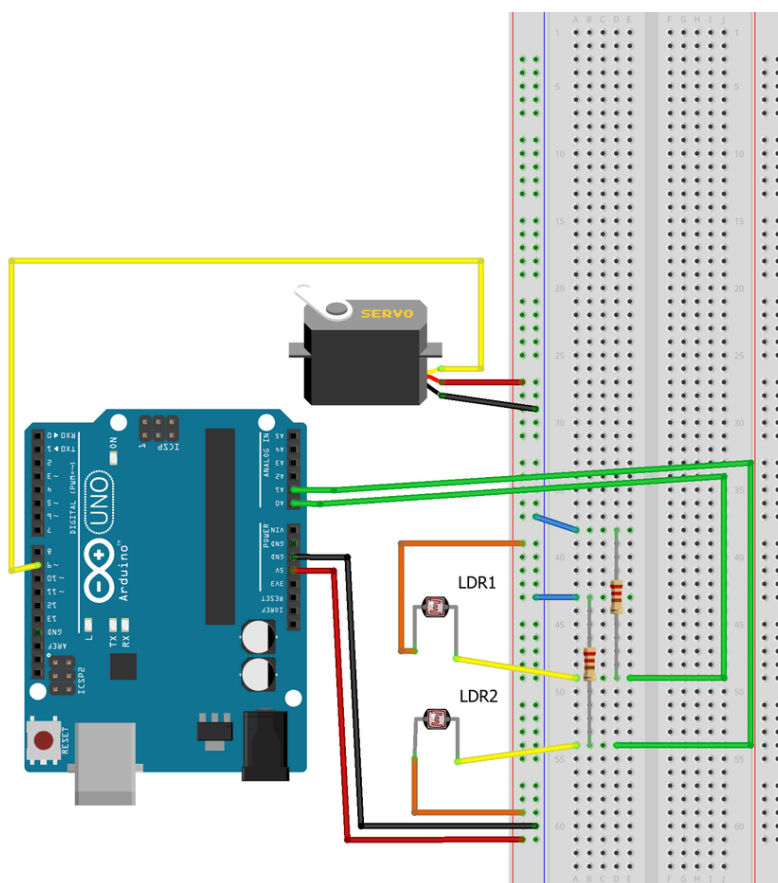


Figura 24: Circuito do seguidor solar

Fonte: Própria

3.8 Controlo do Sistema

A figura abaixo mostra como será realizado o controlo do sistema como forma de realizar a coleta de dados que ajudarão na análise do desempenho do protótipo.

Neste sistema, é aplicado o princípio de Termossifão, sendo que o depósito deve estar localizado acima do coletor. O fluido é empregado em diferentes temperaturas, que permitem a variação de suas densidades, ou seja, com o seu aquecimento, maior será a sua temperatura e menor a sua densidade. Desta forma, há uma tendência de separação do fluido quente na parte superior, e do fluido frio na parte inferior.

No reservatório de água é instalado 3 sensores de nível de água. Um sensor é posicionado no fundo do reservatório, sendo que sempre este não detecta água um alarme é disparado indicando que o sistema está sem água. No meio, para indicar que o reservatório encontra-se no seu nível médio e na parte superior é instalado outro sensor de nível para indicar que o reservatório se encontra cheio, fechando assim automaticamente a válvula de entrada de água fria.

No concentrador é instalado dois sensores de temperatura DS18B20, para medir a temperatura da água na entrada e na saída do concentrador e um medidor de caudal para indicar a quantidade de água que circula pelo concentrador.

Um sensor dht11 é instalado na parte externa para indicar a temperatura ambiente e a umidade. No anexo 1 é indicada a ligação dos sensores no Arduino e os seus respectivos códigos.

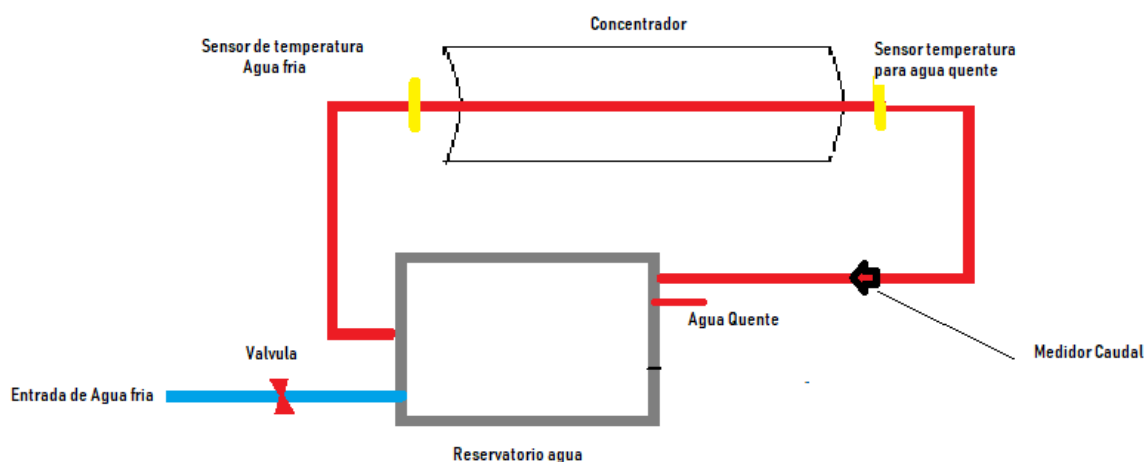


Figura 25: Diagrama de controle

Fonte: Própria

3.9 Custo do Protótipo

A tabela abaixo mostra o custo do protótipo do concentrador solar, sendo que alguns materiais não se encontram na lista dos custos, por utilizar materiais recicláveis e desperdício na oficina de Câmara de São Vicente.

Descrição de Alguns dos Material	Quantidade	Custo (CVE)
Sensor de Temperatura	1	458.00
Tubo de Cobre	1	139.00
Arduíno Uno R3	1	536.00
Sensor DHT11	1	227.00
Servo Motor	1	1 233.00
Módulo Relé	1	860.00
LDR	2	145.00
Rolamentos	2	400.00
Medidor de caudal	1	402.00
Custo Total:		4 400.00

Tabela 7: Custo do protótipo

Fonte: Própria

Com o objetivo de construir um protótipo de concentrador solar cilindro parabólico, que fosse ao mesmo tempo eficiente e de baixo custo, obteve-se por utilizar também objetos recicláveis um custo total do projeto de 5.000\$00 (cinco mil escudos cabo-verdianos).

4- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta fase apresenta-se a análise e discussão dos resultados, tendo em consideração os objetivos da investigação e o teste das hipóteses formuladas. Serão analisados de forma pormenorizada todos os procedimentos efetuados e os respetivos resultados.

O ensaio foi feito no dia 4 de Setembro no terraço da minha casa, em que o dia encontrava-se com o céu quase nublado com uma radiação incidente de 850w/m^2 e com uma temperatura ambiente de 27 graus. O local não possui sombreamento a fim de diminuir a eficiência na hora da recolha dos resultados.

A temperatura da água na entrada do concentrador foi de 25,7 graus Celsius, em que utilizou-se um recipiente de 5 litros, onde na saída do mesmo foi instalado o medidor de caudal. Por ser um protótipo de pequenas dimensões, a temperatura alcançada na saída do concentrador foi de 72,5 graus celsius. Para que essa temperatura fosse aumentada, seria necessária efetuar a associação de mais concentradores em série e em paralelo.

Muitas vezes nos sistemas instalados utilizam um pré-aquecedor para a água (utilizando energia elétrica em funcionamento com combustível) como forma de aumentar a temperatura na saída do concentrador.

É de salientar que se fosse aplicado um material com uma refletância da radiação solar mais próxima de 1, os resultados esperados seriam mais positivos.

5. CONCLUSÃO

Chegado ao fim do trabalho, analisando os resultados obtidos pelo caso proposto, consegue-se uma redução considerável no custo da fatura energética através da redução do consumo de combustível convencional o que traduz em termos ambientais uma redução expressiva de emissão dos gases efeito de estufa.

Sendo que a instalação de um concentrador solar cilindro parabólico para produção de vapor com aproveitamento da energia solar pode ser uma alternativa interessante para as indústrias, visto que estas são os responsáveis pelo maior consumo dos combustíveis fósseis e também os níveis de radiação em São Vicente são altos e quase constantes durante o ano. O custo para efetivação do projeto mostrou-se relativamente baixo face á tendência de consumo de combustível fóssil.

A elaboração do balanço térmico permitiu comprovar a influência que tem os fatores como: rastreamento solar ótimo, projeto geométrico, materiais da fabricação, etc., sobre a eficiência global do sistema.

A construção do concentrador solar se mostrou relativamente simples, podendo ser utilizada como uma fonte de energia adicional à energia elétrica, visto que o mesmo necessita de dias ensolarados, presentes em algumas estações do ano, para apresentar boa absorção da radiação solar e consequente produção de vapor implicando na geração de energia elétrica.

Com o clima propício da região e o alto índice de radiação, a iniciativa se mostrou interessante. Além do projeto ser de baixo custo, tem-se a facilidade de locomoção e instalação para o local desejado e simples monitoramento dos resultados. O concentrador solar construído mostrou-se termicamente viável produzindo vapor, além de apresentar bons resultados de eficiência térmica, ótica quando comparado a outras formas de geração de energia elétrica.

6. RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros, recomenda-se um levantamento bibliográfico mais extenso e aprofundado na área de receptores das tecnologias mais recentes dos concentradores solar cilindro parabólico para continuar descrevendo a evolução e comportamento do sistema solar com novos indicadores tecnológicos de forma mais detalhada e exata.

Ao modelo geral do sistema solar, pode-se adicionar novas rotinas ou modelos térmicos para representar os fenômenos de transferência de calor existentes em cada etapa do sistema, especialmente na superfície do absorvedor. Com isso, recomenda-se a realização de simulações em software tornará uma ferramenta capaz de realizar novos estudos dos efeitos óticos e térmicos mais precisos.

O modelo desenvolvido precisa de um contínuo progresso para aperfeiçoar os cálculos realizados, além de incluir novos parâmetros que afetam o comportamento do sistema que não foram tidos em conta como: diferentes geometrias, tipos de fluidos de trabalho, outros fatores climáticos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, R.; Collares, M. P.; Dumortier, D.; Estrada-Cajigal, V. C. G. ; Granvist, M. A. e Gueymard, C. (2001) *Solar Energy: The State of the Art*, 1st ed. Routledge.

Amorim, H. S., Dias, M. A. e Soares, V. (2015). *Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4.

Andrade, E. (2011). *Solar Térmica Ênfase em Sistemas de Geração de Vapor para Aplicações Industriais*, Dissertação ao Departamento de Engenharia e Ciências do mar da Universidade de Cabo Verde. Mindelo.

Arduino. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 01 Setembro de 2019.

Barbosa, F. V. (2015). *Desenvolvimento de um Concentrador Solar com Sistema de Seguimento*, Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho Escola de Engenharia

Duffie, J. A. e Beckman, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

Duffie, J., A. e Beckman, W., A. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, INC. 4ª ed. 2013.

Energia Solar: *Concentrador solar*, disponível em <https://pt.solar-energia.net/definicoes/concentrador-solar.html> acessado no dia 5 de Abril de 2019.

Electronics, A. (2010). *Temperature and humidity module DHT11 Product Manual*. [S.l.], Acessado em 20/06/2019. Disponível em: <<http://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>>.

Filho, V. (2013). *Análise Experimental de um Sistema Solar com Concentrador Cilindro Parabólico*. Florianópolis Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

International Renewable Energy Agency (2016). *World Energy Outlook 2016*. International Energy Agency.

KATO, Y. (2010). *Splish: a visual programming environment for arduino to accelerate physical computing experiences*, Eighth International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing. IEEE Computer Society.

Kalogirou, A. S. (2014), *Solar Energy Engineering-Processes and Systems*, second edition, Elsevier, New York.

Mazria, E. (1979). *The Passive Solar Energy Book*, 1st ed. Rodale Press.

Mills, D. R. e Morrison, G. L. (2000). *Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants*, Solar Energy, vol. 68, n. 3, pp. 263–283.

Price, H.; Lüpfert, E.; Kearney, D.; Zarza, E.; Cohen, G. R. e Mahoney, R. *Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology*, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 124, pp. 109–125.

Rappaport, P. (1959). *The photovoltaic effect and its utilization*, Solar Energy, vol. 3, no. 4, pp. 8–18, Dec.

Rodrigues, N.D.R.P. (2017), *Sistema de Microgeração de Energia com Base num Motor Stirling*, Monografia em Engenharia Mecânica, Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, Lisboa.

Silveira, P. R. e Santos, W. E. (2002). *Automação e Controle Discreto*, 8 edição, Editora Érica Ltda.

SolarPACES, Solar Power & Chemical .www.solarpaces.org, acessado em 26-03-19.

Teachengineering (2013). *Photovoltaic Efficiency: Solar Angles and Tracking Systems. Fundamental*, [Consult. 15 Agosto. 2019]. Disponível em: https://www.teachengineering.org/collection/cub_/lessons/pub_pveff/Attachments/cub_pveff_lesson01_fundamentalsarticle_v2_tedl_dwc.pdf.

Volker, Q., *Solar thermal power plants*, disponível em: http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals2/index_e.php, acesso em: 08/05/2019.

8. ANEXOS

Anexo 1: Ligação dos sensores no Arduino e os seus respetivos códigos

A. Sensor DS18B20

O sensor é ligado no pino digital 3 do Arduino e é colocado um resistor de 4,7 k para calibração do sensor.

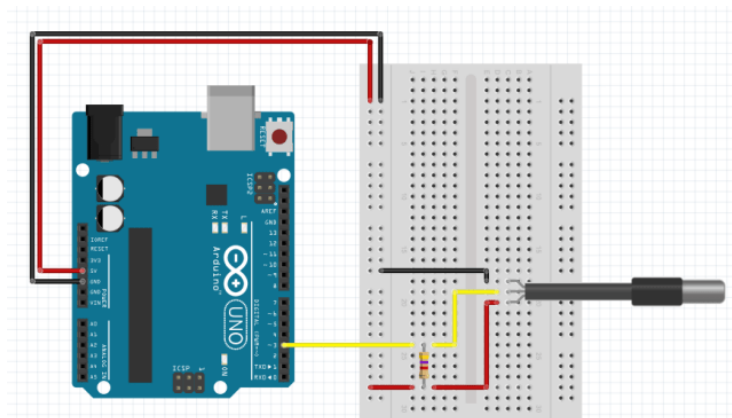


Figura 26: Circuito ligação do DS18B20 no Arduino

Fonte: Própria

A seguir é apresentado o código para leitura do sensor no arduino

```
Sensor_Temperatura | Arduino 1.8.8
Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda

Sensor_Temperatura

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
OneWire pino(3);
DallasTemperature barramento(spino);
DeviceAddress sensor;
void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
  barramento.begin();
  barramento.getAddress(sensor, 40);
}

void loop()
{
  barramento.requestTemperatures();
  float temperatura = barramento.getTempC(sensor);
  Serial.println(temperatura);
  delay(5000);
}

O rascunho usa 3704 bytes (11%) do espaço de armazenamento do programa.
Variáveis globais usam 216 bytes (10%) de memória dinâmica, restam 1088 bytes.
```

B. Sensor DHT11

O pino de dados do sensor é ligado na porta analógica A1 do Arduino.

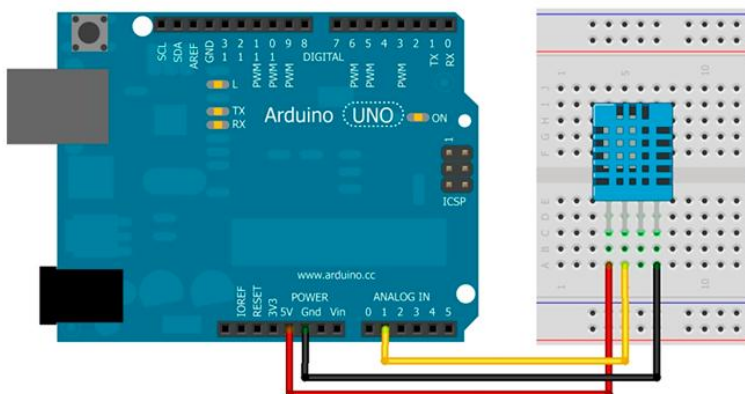


Figura 27: Circuito ligação do DHT11 no Arduino

Fonte: Própria

A seguir é apresentado o código:

```
Ficheiro  Editar  Rascunho  Ferramentas  Ajuda

DHT11 §

#include "DHT.h"
#define DHTPIN
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
}
void loop() {
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();

  Serial.print("Umididade: ");
  Serial.print(h);
  Serial.print("%");
  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.print(t);
  Serial.println(" *C");
}
```

C. Medidor Vazao Yf-S201C

O sensor é conectado no pino 2 do Arduino, conforme mostra o esquema abaixo:

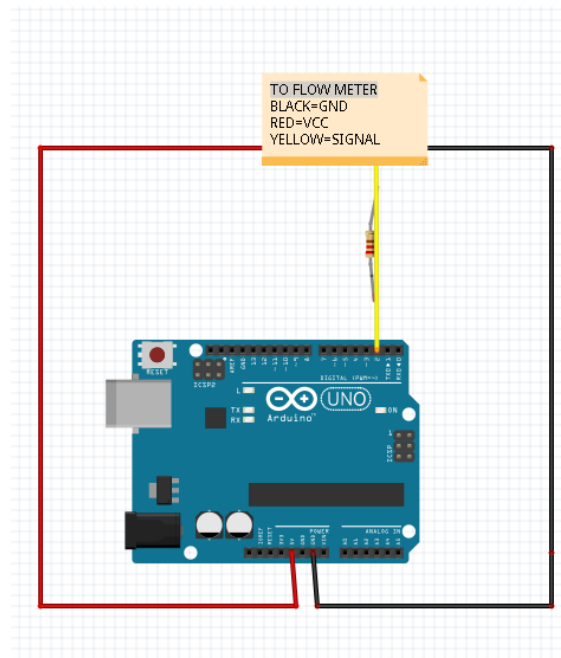


Figura 28: Circuito ligação do Yf-S201C no Arduino

Fonte: Própria

```

Medidor_Caudal | Arduino 1.8.8
Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda

Medidor_Caudal

int NoTopsFan=0;
int hallsensor = 2;
void rpm ()
{
  NoTopsFan++;
}
void setup()
{
  pinMode(hallsensor, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, rpm, RISING);
}
void loop ()
{
  delay (1000);
  float Calc = (NoTopsFan * 60 / 5.5);
  Serial.print (Calc, DEC);
  Serial.println (" Litros/min\r\n");
}

O rascunho usa 3704 bytes (11%) do espaço de armazenamento do prog
Variáveis globais usam 216 bytes (10%) de memória dinâmica, restan

17 Arduino/Genuino Uno em COM22

```

Anexo 2: Acessórios Diversos Utilizados no Protótipo



Arduíno Uno R3



Medidor de caudal



Sensor de Temperatura



Sensor DHT11



Servo Motor



Módulo Relé

Anexo 3: Ensaios do Protótipo

